

中国电力百科全书

（第三版）

·配电与用电卷·

《中国电力百科全书》编辑委员会 编
《中国电力百科全书》编 辑 部 编

中国电力出版社




中国电力出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION
"十二五"国家重点图书
出版规划项目



中国电力百科全书

（第三版）

配电与用电卷

《中国电力百科全书》编辑委员会
《中国电力百科全书》编 辑 部
编

CHINA
ELECTRIC POWER
ENCYCLOPEDIA

中国电力出版社



图书在版编目（CIP）数据

中国电力百科全书. 配电与用电卷 /《中国电力百科全书》编辑委员会，《中国电力百科全书》编辑部编. —3 版. —北京 ：中国电力出版社，2014.6
ISBN 978-7-5123-5115-8

Ⅰ.①中… Ⅱ.①中… ②中… Ⅲ.①电力工业-中国-百科全书②配电系统-概况-中国③用电管理-概况-中国 Ⅳ.①TM-12

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 256082 号

中国电力出版社出版、发行（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn）
北京盛通印刷股份有限公司印刷 各地新华书店经售
1995 年 11 月第一版 2014 年 6 月第三版 2014 年 6 月北京第三次印刷
889 毫米×1194 毫米 16 开本 40.25 印张 1778 千字
印数 15001—20000 册 定价 **356.00** 元

中国电力百科全书

（第三版）

编辑委员会

中国电力百科全书

（第一版）

编辑委员会

编辑委员会办公室

编　辑　部

中国电力百科全书

（第二版）

编辑委员会

编辑委员会顾问委员会

编辑委员会办公室

编　辑　部

配电与用电卷

（第三版）

编审委员会

主　　编	周永兴
副 主 编	俞国勤　方耀明　李天友
编审领导小组	周永兴　俞国勤　方耀明　李天友　肖　兰 李慧芳　潘国美
编　　委	（按姓氏笔画排列） 方耀明　石文鹏　刘利军　刘树德　刘福义 关　宏　孙　凯　苏鹏程　李天友　李永莱 李　扬　李　奎　李慧芳　肖　兰　肖　曦 余维江　汪　猛　张亚晨　张　弛　张建勋 陆业大　陈　敏　邵晓钢　周永兴　赵建平 俞国勤　徐丙垠　盛　明　谢　伟　翟向向 潘国美
学术秘书	潘国美　李慧芳

各分支主编、副主编

概论分支

主　　编　俞国勤（兼）

副 主 编　谢　伟

配电网及其设备分支

主　　编　李天友（兼）

副 主 编　汤　军

配电运行与检修分支

主　　编　关　宏

副 主 编　刘树德

配电网继电保护控制与自动化分支

主　　编　徐丙垠

副 主 编　张　弛

电力营销分支

主　　编　方耀明（兼）

副 主 编　盛　明

需求侧管理分支

主　　编　方耀明（兼）

副 主 编　李　扬

低压电器与安全用电分支

主　　编　李永莱

副 主 编　李　奎

农村用电分支

主　　编　刘福义

副 主 编　翟向向

电气照明分支

主　　编　赵建平

副 主 编　汪　猛

电力拖动分支

主　　编　肖　曦

副 主 编　孙　凯

电化学分支

主　　编　邵晓钢

副 主 编　陆业大

电加热及电焊分支

主　　编　余维江

副 主 编　张建勋

电气化铁路与电动汽车分支

主　　编　陈　敏

副 主 编　苏鹏程

家用电器分支

主　　编　张亚晨

副 主 编　石文鹏

• 用 电 卷 •

（第一版）

编审委员会

各分支主编、副主编、编审组成员

· 用 电 卷 ·

（第二版）

编审委员会

主　　　编　徐纪法

副　主　编　赵学林　肖辉乾

编审领导小组　徐纪法　赵学林　肖辉乾　张克让　肖　兰

编　　　委　（按姓氏笔画排列）

方耀明　吕光大　刘有常　李临明　肖　兰

肖辉乾　吴天汉　张克让　陈留根　金敀玫

赵学林　原固均　顾嘉栗　徐纪法　郭喜庆

缪耀珊

各分支主编、副主编

概论分支

主　　编　徐纪法（兼）

电力营销与需求侧管理分支

主　　编　方耀明

低压配电及安全用电技术分支

主　　编　赵学林（兼）

农村用电分支

主　　编　原固均

副　主　编　郭喜庆

电气照明分支

主　　编　肖辉乾（兼）

电力拖动分支

主　　编　金敀玫

电化学分支

主　　编　李临明

电加热及电焊分支

主　　编　陈留根

电力牵引分支

主　　编　吴天汉

副　主　编　缪耀珊

家用电器及其他分支

主　　编　刘有常

第三版前言

《中国电力百科全书》（简称《电百》）第三版在中国电机工程学会成立80周年之际与广大读者见面了。《电百》是全面介绍电力科学技术和管理知识的大型专业性百科全书。《电百》的首次编纂始于1986年，先后于1994年和2001年出版发行了第一版和第二版。《电百》问世以来，受到了广大电力工作者和电机工程界人士的欢迎并得到认可，成为查阅电力基本知识的权威工具书。

《电百》第一版是由原水利电力部、中国电机工程学会、中国水力发电工程学会等共同倡议，从1986年开始，历时8年编纂完成的。全书分为《综合卷》《电工技术基础卷》《电力系统卷》《火力发电卷》《水力发电卷》《核能及新能源发电卷》《输电与配电卷》《用电卷》共8卷，5000多个条目、1000余万字。全书总结了当时电力工业科学技术成就以及生产和建设的经验，适应了电力科技人员和职工学习新技术、新知识的迫切需要。《电百》第二版的修编工作是在原国家电力公司组织下，从1998年开始到2000年完成。全书仍为8卷，共5400余条目，约1000万字，反映了20世纪最后十多年电力工业的快速发展和电力科技的进步，适应了中国电力工业发展的需要。《电百》第二版于2002年荣获第十三届中国图书奖。

《电百》第二版发行至今的十多年间，中国电力工业持续快速发展，电力科技水平不断提高。中国电力装机容量和发电量分别从2000年的3.19亿kW、1.37万亿kW·h提高到2013年的12.47亿kW和5.3万亿kW·h，均居世界第一位。电网发展也实现了历史性跨越，规模居世界第一，已经形成以区域同步电网为基础的全国互联电网（未计台湾省）。这十多年，电力系统结构逐步优化，技术装备水平快速提升，节能减排成效显著。电力系统的安全性、可靠性、经济性取得全面提高，适应了经济和社会发展对用电量增长和安全可靠供电的需要，有力支撑了国民经济的持续快速发展。

进入21世纪，中国经济社会发展的重要特征是工业化、信息化、城镇化、市场化、国际化，能源结构清洁低碳化趋势显著。这些重大社会需求决定电能高效清洁的生产、输送、分配和使用技术，已成为电力技术发展的主导方向，并且日益显现出新技术与传统技术交叉与融合的趋势。因此，有必要对《电百》第二版进行修编，更新和充实《电百》的内容，以充分反映21世纪头十年电力工业发展的新成就和电力科技发展的新特征。

2009年5月，在中国电机工程学会第九届会员代表大会上提出了《电百》第三版修编工作建议，得到会员单位广泛支持。2011年1月25日，《电百》第三版编辑委员会第一次会议在北京召开，修编工作正式启动，确定修编原则是“增补为主，简当为要”。

增补为主，就是要增补体现电力工业和电力科技发展的新内容。如全球气候变化、全寿命周期管理、信息安全等问题；在水力发电技术方面，包括高坝筑坝新技术、大型水轮机组集成技术、梯级水库群优化调度技术等；在火力发电技术方面，包括超超临界燃煤发电、大型火电机组直接空冷、整体煤气化联合循环发电（IGCC）及多联产、污染物控制和减排等技术；在现代核电技术方面，包括对投运核电机组通用技术的系统性介

绍，第三代先进压水堆技术AP1000、EPR，以及模块式高温气冷堆技术和第四代核能系统概况等；在可再生能源发电技术方面，包括风能资源评估、新型风电机组总体设计和关键部件制造、风电并网等技术，太阳能热发电及分布式光伏发电技术，以及深层地热和海洋能、潮汐能发电等新技术；在电网技术方面，包括特高压交直流输电技术、750kV超高压输电技术、智能电网技术、大型互联电网的分析和控制技术、电压源型直流输电技术等；还有现代信息通信技术、电力电子技术的新发展和新材料在电力系统中的应用等等。

根据电力科技发展的新趋势，《电百》第三版共设9卷，在第二版8卷的基础上，将《输电与配电卷》更名为《输电与变电卷》、《用电卷》更名为《配电与用电卷》，将《核能及新能源发电卷》拆分为《核能发电卷》和《新能源发电卷》。第三版的条目总数约为6300条，字数约1300万字。条目释文中，中国电力工业的数据一般截至2012年12月，国外电力工业的数据一般截至2011年12月，能源资源等数据以最新公布的为准。

简当为要，是百科全书的特征之一。百科全书是概要记述人类知识的大型工具书。《电百》第三版的释文编纂按照百科体例的编纂要求和"全、精、新、信、达、雅"的撰写质量要求，依据科学性、客观性、概述性、整体性、稳定性、可读性、规范性的百科特点进行修编。全书统一编纂指导思想、框架设计和体例要求，解决内容重复、交叉、矛盾和遗漏等问题。对修编条题，注重其概要性、知识性和逻辑性；对新增条题，博览精收、慎重选材，做到既简且当。同时，各卷都编写了概述性文章（专文）和大事年表。概述性文章是对本卷内容概括性介绍，体现本专业的特点、发展、现状和水平；大事年表是以编年体形式记录具有全局性、标志性、方向性的事情。读者通过概述性文章和大事年表可以对电力技术的发展有全面系统的了解，更加体现了简当为要的要求。

《电百》第三版修编实行主编责任制，编辑委员会组织了既有理论底蕴又有实践经验的1500多位专家、学者参与条目的撰写和审稿，其中卷正副主编和分支正副主编220余位。

《电百》第三版贯彻以科学发展观为指导，谋篇、谋卷、谋书，努力用全面协调可持续发展的观点，分析判断近十年来电力科技领域出现的新事物和新观点，集中反映21世纪初中国电力科技事业蓬勃发展的概貌，展示出其对中国乃至世界电力工业技术发展基本走向的影响。

在《电百》第三版即将付印的时候，我们十分感念那些为"电力百科"开启山林的拓荒者，他们为我们做出了榜样。《电百》第三版继承了第一、二版在知识分类、编辑体例、图表配置、全书条题检索等方面的工作经验和成果，并将前一、二版的双色印刷调整为全彩印刷，将原正16开本调整为大16开本，从而使第三版从内容到版式都有了更大的改进。令我们感到鼓舞的是，《电百》第三版获得了2014年度国家出版基金的资助，入选《2013—2025年国家辞书编纂出版规划》。

我们还要再一次向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！1500多位专家、学者的志愿工作、三年多的智慧和心血，凝结成为今天的鸿篇巨制。电力科学技术在飞速发展，希望《电百》第三版对电力科技工作者和管理人员能够有所裨益，更好地发挥其"没有围墙的大学"的功能。

《中国电力百科全书》编辑委员会

《中国电力百科全书》编　辑　部

2014年5月

第一版前言

经过8年的反复锤炼，《中国电力百科全书》终于脱稿付印，陆续出版了！这是1700多位专家，以高度的政治责任感和历史责任感辛勤耕耘、反复切磋的成果。参加这部百科全书编纂工作的同志大部分是电业部门的专家和著名大学的教授，也有很多电机制造部门的专家，用电电器研究方面的专家，核工业专家，能源专家，环境保护专家等等；他们是各个专业方面的权威人士，大都年事已高，仍不遗余力地以自己毕生的经验，参照大量的国际资料，字斟句酌地推敲每一个条目的释文；他们以满腔热情，努力争取时间，完成了5000多个条目、1000多万字的撰写、审阅、修改工作；在编写过程中有的老专家废寝忘食、带病工作，有的已经谢世。我们以十分崇敬和感激的心情向为本书工作过的专家们致以崇高的敬礼！

《中国电力百科全书》是于1986年8月由原水利电力部科技司、中国电机工程学会、中国水力发电工程学会、原水利电力出版社共同倡议，经原水利电力部部长批准，着手组织编纂的。1987年8月，在北京召开了编辑委员会成立大会，初步确定了分卷方案和条题框架，聘请各卷主编和各分支主编。之后，几经修改，拟定了各卷的条题总表，聘请了撰写和审阅的专家，于1989年着手撰写，先后经过分支的一审、修改，分卷的二审、修改，编委会常务领导小组组织的终审，再由分卷修改正式定稿。

编纂《中国电力百科全书》的目的，在倡议报告中已经指明，是“为了总结我国电力工业生产、建设的经验，介绍当代电力工业最新科学技术成就，迎接电力工业更大规模的发展，满足电力系统广大职工的需要。”当前，我们正在建设规模宏伟的现代化的电力工业，我们正在深入改革开放，经历从高度集中的计划经济到社会主义市场经济的变革，成百万的电业职工迫切需要学习新的技术和新的管理知识。同时，随着我国工农业现代化程度的提高，人民生活电气化程度的普及和提高，社会上对电力知识的需要也日益广泛。为此，本书的编纂，从格式到内容，均以满足电力科学技术人员、各级领导和管理人员、广大电业职工和大专院校电力类专业师生的需要为主，同时照顾到社会上广大读者的需要，力求深入浅出，使具有高中以上文化程度的人均可阅读。

《中国电力百科全书》是中国第一部全面介绍电力科学技术和管理知识的大型专业性百科全书。在编纂过程中，我们学习和借鉴了《中国大百科全书》的编纂经验，同时，也汲取了此前编纂的《中国水利百科全书》的经验。百科全书要求表达人类成熟的知识，要求所表达的知识具有科学性、客观性和稳定性，亦即具有一定的权威性。为此，本书在条题名称的选定和条目释文的概念叙述方面，均力求符合当代国际电业界一般共有的认识，对于某些国内惯用的概念与国外流行的概念不一致的，均分别加以说明。考虑到篇幅浩大，读者所需要的专业内容不一，特将全书按专业分为既有联系又相对独立的8卷，即：综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能及新能源发电、输电与配电、用电。读者可购置全套8卷，也可购置其中任何一卷。每卷条目排印均按

条目首字的汉语拼音顺序排列。为了便于读者按专业查找相关条目，在书首设有按专业知识分类的条目分类目录，在书尾设有3种检索系统，即条目汉字笔画索引、条目外文索引、内容索引。综合卷后还附有外国（国际）电力（能源）组织机构和学术团体译名对照表，以及中国电力工业大事年表。

为了记录近百年来，特别是中华人民共和国成立以来，为中国电业发展做出过重要贡献的人物，为中国电业发展培养了大量科技人才的优秀教师和学者，以及为中国电业的发展提供电力设备的电机、电器、动力设备制造部门的著名专家，共收录了3000多位人物的业绩，编纂了《中国电力人物志》，作为《中国电力百科全书》的附卷单独出版。

以上8卷和附卷中，条目释文中所载的史实和数据大都截止到1990年12月；对1990年12月之后国际时局的变化所引起国家的改变，均未作相应的修改。

本书的编纂和出版，是广大专家集体智慧的结晶和集体工作的成果，一个条目的释文往往经过多位专家多次修改才得以定稿，前后变动很大，甚至重新改写。但是，应该说明，没有第一稿的写出，也改不出最后一稿。所以，一个条目的写定，既是最后执笔者的成果，也是第一稿执笔者的成果。在反复修改过程中，专家们都不固执己见地热烈参与磋商讨论，务求循名责实，考虑全面，得出一个正确的概念，在这方面充分体现了他们对事业的政治责任感和对后代的历史责任感。电力方面的百科全书，在中国这是第一部，在国外，我们也未见先例。因此，尽管我们尽其可能地作了努力，但疏漏与错误之处还不可避免，我们诚恳地希望广大读者和专家给予批评和指正，以期本书再版时订正提高。

再一次向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢！

《中国电力百科全书》编辑委员会
《中国电力百科全书》编　辑　部
1994年6月

第二版前言

《中国电力百科全书》(简称《电百》)的编纂工作始于1986年，在国家电力领导部门的重视和社会各界的关注下，全国1700多位专家、学者历时8年终成腋裘，付梓刊行。

《电百》(第一版)条目释文引用的数据和资料基本上截至1990年底。十年来，世界电力工业的状况发生了重大变化。作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，电力在推动社会经济进步、提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。十年来，电力工业围绕进一步提高能源利用效率和供电可靠性，加强对生态环境的保护从而实现可持续发展，在许多技术领域取得了重大进步。例如，在洁净煤发电技术研究开发与应用方面，已相继建成示范电厂并开始商业运营；大容量、超临界和超超临界压力机组迅速发展，正在成为发达国家火力发电厂的主力机组；广泛采用新技术加强对有害排放物、电磁波、放射性污染的治理；高电压、大容量、远距离交直流输电技术和电力系统理论与技术的继续进展与提高；高效率燃气轮机技术的发展与应用；分散型电、热、冷三联供装置和大幅度提高电力用户终端效率的各种新技术、新装置的相继出现，以及计算机技术和信息网络技术在电力工业中的应用等等，正在明显地改变电力工业的技术状况。与此同时，世界范围内经济的市场化、信息化、全球化正在给电力行业传统的垄断地位和经营方式带来巨大的冲击。随着竞争机制的引入，许多国家的电力管理体制已经或正在经历空前的变革，向着放松管制的商业化、民营化方向发展。

在世界各国电力科学技术发展和管理体制变革的同时，中国电力工业在90年代取得了突飞猛进的发展。从1996年下半年起，全国电力供需基本平衡，结束了持续20多年全国性缺电的局面，基本上适应了国民经济发展和人民生活水平提高对电力的需求。1995年全国电力装机总容量达到2亿kW，年发电量超过10000亿kW·h；1999年全国电力装机总容量达到2.98亿kW，年发电量达到12331亿kW·h；2000年4月，我国的装机容量超过了3亿kW。无论在电力装机容量上还是在发电量上，中国电力都已居世界第二位。到1999年底，已建成和正在建设的100万kW及以上的火电厂、核电厂和水电站已超过100座，其中邹县发电厂240万kW，二滩水电站330万kW。世界最大的水电站、装机容量达1820万kW的三峡水电站已于1994年12月开工建设、1997年11月实现了大江的截流，即将于2003年开始并网发电。继秦山核电厂和广东大亚湾核电厂投产后，广东岭澳核电厂(180万kW)和秦山第二核电厂(120万kW)、秦山第三核电厂(140万kW)及田湾核电厂(200万kW)均已开工建设。风力、地热、太阳能、潮汐等可再生能源发电也得到进一步的发展。全国风力发电装机总容量已达26.7万kW，在中国的西部地区建成了一批小容量试验性的太阳能光伏电站。到90年代末，中国已建成的500kV输电线路约2.29万km，变电容量8012万kV·A；330kV输电线路7949km，变电容量1248万kV·A；220kV输电线路12.18万km，变电容量2.80亿kV·A；同时还进行了大规模的城乡电网建设与改造。目前在全国已形成了7个跨省的大型区域电网和5个独立省网，其中最大的区域电网

华东电网装机容量已达 5198.64 万 kW，最大的省网广东电网装机容量也达到 3033.37 万 kW，全国电网的覆盖率已达到 96.4%。中国的电网已进入了跨大区、跨独立省（区）电网互联的阶段，并正在走向全国联网的超高压、高度自动化的现代化电力系统的新阶段。

在过去的 10 多年里，中国电力工业的管理体制经历了巨大的变化。1988 年 4 月撤销了水利电力部，成立了能源部；1993 年 3 月又撤销能源部，组建电力工业部；1997 年成立国家电力公司，1998 年电力工业部撤销。按照国务院的改革方案，国家电力公司经营管理授权范围内的国有电力企业，国家经贸委行使管理中国电力工业的政府职能，中国电力企业联合会行使电力行业管理与服务职能。这是中国电力管理体制的重大改革，是中国电力工业由计划经济向市场经济转变的重要标志。

根据电力科学技术在 90 年代所取得的重大进展、管理体制的变革情况，以及中国国民经济在 2000～2010 年期间再翻一番和 2010 年中国电力装机总容量将发展到 5 亿 kW 的总目标，为了使《电百》的内容能够反映当前国际和国内电力工业的最新技术和管理水平，适应 21 世纪前十年我国电力工业发展的需要，进一步满足各级领导干部、电力系统内外的科学技术和管理人员以及广大读者查询、浏览、了解现代电力科学技术和管理知识的需求，中国国家电力公司决定，对《电百》（第一版）进行修订，并于 2000 年 9 月起陆续出版《电百》（第二版）。

编纂出版《电百》（第二版）的总原则是：在第一版的基础上对各卷内容删繁就简，增补更新，力求达到精益求精；努力增加最新电力科学技术成就和管理经验的内容，注意解决第一版中存在的问题和不足；使《电百》（第二版）具有时代特征，符合规范要求，开卷有益，查阅方便。

《电百》（第二版）的编纂工作于 1998 年 8 月起动。为了使《电百》能以条目的形式汇集和总结电力科学技术和管理知识，真正发挥大型专业性百科全书的作用，我们组织了电力工业各门类的约 1100 位专家、学者参加了修订、编纂和审稿工作。这些专家怀着满腔热忱、高度责任感和使命感，废寝忘食、夜以继日地工作，以广博的知识和丰富的经验，使《电百》条目的释文尽可能完美地体现其思想和智慧。

《电百》（第二版）仍沿袭第一版的做法，采用按专业分类分卷、各卷条目按汉语拼音字顺编排的出书方式。全书仍分为综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能及新能源发电、输电与配电、用电等 8 卷，释文共有 5400 余条目，总字数约 1000 万字，其中新增条目和经过修改的条目约占全书的 70%以上。

尽管我们期待《电百》不仅具有电力科学技术知识的魅力，同时具有文字的魅力和鲜明的时代色彩，尽管我们希望广大读者在阅读与浏览，查询与解惑中能达到充实自己的目的，但书中难免有疏漏和错误之处，恳请读者批评指正，以期再版时订正。

谨向所有关心、支持和参与本书编纂出版的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢，是他们卓有成效的努力使本书为广大读者营造了一个开卷有益的氛围，使本书以气势恢宏的构架、翔实丰富的内容、精辟练达的文字、生动具体的彩色插图导引读者漫游电力科技知识的海洋。

《中国电力百科全书》编辑委员会
《中国电力百科全书》编　辑　部
2000 年 9 月

凡　　例

一、编　　排

1. 全书按专业知识领域分为综合、电工技术基础、电力系统、火力发电、水力发电、核能发电、新能源发电、输电与变电、配电与用电等9卷出版。

2. 各卷按前言（包括全书第三版前言、第一版前言、第二版前言），凡例，概述性文章，本卷第一、二版前言，条目分类目录、正文、大事年表、条目标题汉字笔画索引、条目标题外文索引、内容索引、插图索引、附录等编排。

3. 全书的主体是条目。条目既是基本知识单元，也是基本寻检单元。条目由条目标题（条题）、释文和相应的图片、表格、参考书目等组成。

4. 全书条目按条目标题的汉语拼音字母顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括㇆乚く等）的顺序排列。第一字相同时，按第二字，余类推。条目标题以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的，按习惯发音依次排在汉语拼音相应字母部的前部。

5. 各卷在条目分类目录之前均有一篇介绍本卷内容的概述性文章。概述性文章从宏观上展现本卷的形象，且把本卷组成一个有机的整体，对本卷的条目起到统领作用，成为本卷的纲要。概述性文章介绍了本卷的专业特点、内容范围、历史发展和现状等内容，以帮助读者对本卷有概略而全面的了解。

6. 各卷均列条目分类目录，供读者按学科知识体系查检所需要的条目。为了保证各分支体系的完整性，有少数条目在不同分支目录里重复出现。条目分类目录还反映出条目间的系统性、层次性，例如：

电动机
　直流电动机
　　永磁直流电动机
　交流电动机
　　感应电动机
　　　笼型感应电动机
　　　绕线转子感应电动机

7. 为保持知识体系的完整性和便于读者查阅，内容完全相同的条目，可以重复出现在不同卷。对卷间交叉的知识主题，条目列在以学科知识内容为主的卷中，在其他卷中则通过条目标题加以区别。

二、条　目　标　题

8. 条目标题由词或词组组成，例如“照度”“电解”“铝电解”；“电能计量装置”“功率因数调整电费”。

9. 条目标题一般由汉语标题和与汉语标题相对应的汉语拼音、外文三部分组成。例如：

dianqihua tielu

电气化铁路　(electric railway)

个别无通用译名的纯属中国内容的条目标题则不附外文。条目标题有多个对应外文的，中间用分号（;）隔开。

三、释　　文

10. 条目释文使用规范化的现代汉语书面语言。条目释文开始一般不重复条目标题。

11. 条目释文较长时，设置层次标题。

12. 条目内容涉及其他条目并需由其他条目的释文补充的，采用“参见”的方式。所参见的条目标题在释文中出现的，用楷体字排印，例如“依靠直流电源运行的*电动机*”。所参见的条目标题未在释文中出现的，则另用括号加“见”标出，例如“标志分颜色标志和图形标志（见*用电安全标志*）”。全条与其他条目密切相关时，参见放在释文末尾，另行起写“见×××。”，不加括号。

13. 条目释文中出现的外国人名，第一次出现时在姓（汉译）前均加有外文名的缩写（即名的第一个字母），并在括号内附对应外文，例如 T. A. 爱迪生（Thomas Alva Edison 或 T. A. Edison）。外国地名一般不附原文，个别生僻无标准译名的则在第一次出现时用括号附原文。

四、插　　图

14. 条目释文中配有必要插图，均随文编排。

15. 插图一般与释文相呼应。只有一个插图时，不编号。

16. 插图附有图题、图注等说明性文字。

五、参　考　书　目

17. 部分条目释文后附有参考书目，供读者选读。

六、索　　引

18. 各卷正文后均附有全部条目标题的汉字笔画索引、条目标题的外文索引，以及按音序编排的内容索引和插图索引。

七、其　　他

19. 全书所用科技名词术语以全国科学技术名词审定委员会审定的为准，未经审定和尚未统一的，从习惯。地名以中国地名委员会审定的为准。

20. 全书所用汉字除必须用繁体字的以外，一律使用国务院 2013 年 6 月公布的由教育部、国家语言文字工作委员会制定的《通用规范汉字表》所列的汉字。

21. 全书数字的使用，均执行 GB/T 15835—2011《出版物上数字用法》。

22. 全书所用计量单位，除引用经验公式或涉及实验数据的精度难以改变，以及历史上所用的某些单位外，一律采用中华人民共和国法定计量单位。在表达量值时采用单位的国际符号。

23. 全书所列中国统计数据，一般未包含台湾省和香港、澳门特别行政区数据。

电能应用，让生活更美好！

周永兴

电能的应用始于19世纪末西方工业文明发展的初期，它以摧枯拉朽之势扫荡了农耕社会的每一个角落。电力工业的形成和发展彻底改变了人类历史的发展进程，加速了西方国家现代工业社会的转变历程，促进了人类社会的进步和世界经济的发展。1879年，电力文明的火炬从法拉第的手中辗转到中国，在上海英租界的一幢仓库里，以1台蒸汽机拖动的发电机点燃第一盏碳极弧光灯。1882年7月26日，英国商人R. W. 立德尔（R. W. Little）创办的中国第一座发电厂正式发电，点燃了沿外滩至虹口招商局码头的15盏电弧灯。这一天成为中国电力工业诞生之日，这一年仅比标志世界电力工业起步的法国巴黎发电厂开始发电晚7年。

进入到现代社会，电能更成为一种不可或缺的能源形式。现代化的社会生产生活无时无刻不依赖于电能的应用。用电设备也不再仅局限于照明和电力驱动，还包括电化学、电加热、电力牵引等多种工农业负载，以及空调、电冰箱、电视机等多种类型的家用电器设备。

与此同时，各行业的电能用户对供电水平和电能质量的要求也逐步提高。无论是工商业用户还是普通居民用户，都不再仅仅满足于“不停电”，而要求得到质量合格的电能。21世纪的今天，整个人类的生产、生活已经与电力密不可分。电力，已成为人类生活和经济发展不可缺少的要素。

光明的历程

在中国古代神话中，最为壮美的是夸父逐日。夸父的精神千万年来鼓舞着向往光明、追求辉煌的人们。1831年，英国物理学家M. 法拉第（M. Faraday）在软铁环两侧分别绕两个线圈，其一为闭合回路，在导线下端附近平行放置一磁针，另一与电池组相连。实验发现，合上开关，磁针偏转；切断开关，磁针反向偏转——这便是电磁感应现象。这一现象的发现，揭示了电与磁的联系，开启了一扇崭新的物理学世界的大门并促使发电机问世。1866年，德国人E. W. 西门子（E. W. Siemens）制成发电机；1870年比利时人Z. T. 格拉姆（Z. T. Gramme）发明电动机；1873年的维也纳万国博览会上展出了一台用蒸汽机拖动的发电机，向1km外的一台原动机供电，带动一台水泵运转，这是电能开始在动力上应用的前奏。1875年法国巴黎北火车站开始用弧光灯照明，成为社会用电的标志。1879年，美国发明家T. A. 爱迪生（T. A. Edison）研制出碳丝白炽灯泡，以电为能源的照明开始用于室内并迅速得到推广。同年，直流电动机应用在德国的城市公共电车上，这是世界上第一辆公共电车。19世纪80年代，铝、镁、铜、锌的电解提取和直流电弧炉的金属冶炼试验获得成功；90年代，电解制碱工艺、各种电阻炉、效率更高的钨丝白炽灯问世。在此期间，直流发电受发电机电压的限制，输送距离有限，随

着变压器、交流发电机、**电动机**的问世，输电方式从单相交流发展为三相交流，输电距离大幅度增加，为电能的应用和远距离输送开辟了道路。20世纪初，**水电解**提取氢、氧以及合成氨制取技术也达到了工业化生产水平，为电能的更加普遍应用创造了技术条件。此后，电车、电钻、电焊机等电气产品如雨后春笋般涌现出来，电力工业和电器制造业迅速发展，人类正式跨入了电气时代。

科学技术史说明：电机的产生、电力的应用是具有划时代意义的。如果说以蒸汽机的应用与改进标志着第一次技术革命，那么，以电力的应用为特征的第二次技术革命，创造了比蒸汽时代大得多的生产力，诞生了电力工业、石油化工工业、炸药等合成化工工业。电能应用在人类发展的历史上产生了不可估量的影响，正如恩格斯（见图1）所说，“这实际上是一次巨大的革命。蒸汽机教我们把热变成机械运动，而电的利用将为我们开辟一条道路，使一切形式的能——热、机械运动、电、磁、光——互相转化，并在工业中加以利用……这一发现使工业几乎彻底摆脱地方条件所规定的一切界限，并且使极遥远的水力的利用成为可能，如果最初它只是对城市有利，那么到最后它终将成为消除城乡对立的最强有力的杠杆”。一个多世纪以来人类社会的发展历程，充分说明了这一预见的正确性。


图1　恩格斯（1820—1895）

与西方国家相比，19世纪的中国虽然不是一个经济发达的国家，但这并没有妨碍中国成为世界上发电较早的国家之一。1882年由英国人R. W. 立德尔在上海创办的中国最早的发电厂虽然装机容量只有11.63kW，但它比美国纽约珍珠街电厂早2个月，比俄国彼得堡电厂早1年，比日本茅场町发电所早5年。1888年，清宫廷为慈禧太后装设电灯（见图2），成立西苑电灯公所。此后，电力文明的星星之火借着洋务运动三位代表人物——李鸿章、左宗棠和刘铭传之手，在中国这块古老的土地上开始燃烧。从英国人R. W. 立德尔创办中国第一家发电厂到洋务运动催生的民族电力工业，仅仅十余年，公用电业相继在上海、广州、天津、汉口等租界建立。1904年在台北附近的淡水河支流新店溪上建成的龟山水电站，装机容量600kW，是中国最早的水电站。中国人自己兴办的最早的水电站是始建于1910年的云南省石龙坝水电站。此后，中国的电力工业取得了较快发展。辛亥革命后，民族工商业发展壮大，江苏、浙江、广东、辽宁、湖北等地的大中城市纷纷兴办电业。


图2　颐和园排云殿内的五彩电灯

（1888～1907年20年间，清宫廷先后在西苑、颐和园、宁寿宫建成3处电灯公所，共安装发电机3台，总容量不足50kW，供宫廷用电。其中西苑和颐和园的两处设备于1900年八国联军侵占北京时被破坏）

1913年落成发电的杨树浦发电厂（见图3），是当时远东地区第一大电厂。1925年，戚墅堰电厂的供电范围东起无锡西至武进，电力灌溉范围达65 000余亩。1930年，全国电气事业指导委员会公布了《电压周波标准》，用户端电压为380V和220V，为中国电力工业实现早期标准化打

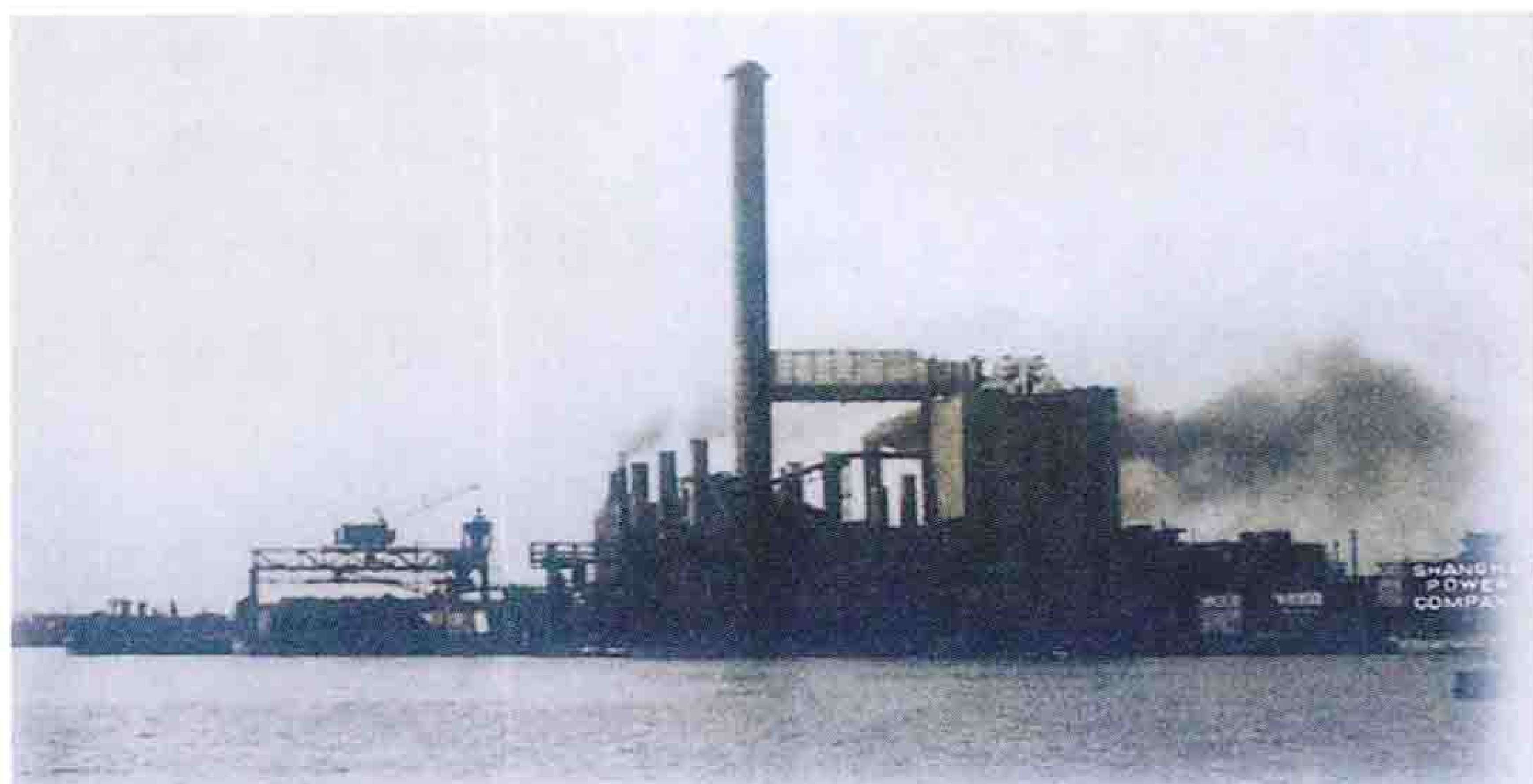


图3 1936年上海杨树浦发电厂外景图

[1913年美商上海电气公司建成装机容量为10400kW的江边电站（1950年更名为上海杨树浦发电厂），至1936年该厂装机容量达18.35万kW，是当时中国和亚洲最大的火力发电厂]

下了良好的基础。

1949年后，中国对电力工业进行了大量投资，使之得到快速发展。到1984年底，全国发电量达到3770亿kW·h，是1949年43亿kW·h的87.67倍；发电装机容量达到8012万kW，是1949年185万kW的43.31倍。电能供不应求的局面得到改善，基本可以满足全社会各行业和普通居民的用电需求。而此时落后的电能管理分配手段与社会大众的物质文化生活需求之间的矛盾逐步凸显出来。1990年5月召开的全国城市电网工作会议中明确了**城市配电网**在电力系统的重要位置，要求采用性能优良的电力装备，以提高供电能力、保证**供电质量**。以此为开端，从20世纪90年代开始，中国的**配电网**进入了发展建设的快车道。伴随着通信技术和信息化系统的发展，电气设备的远程测量、通信、控制技术日渐成熟，用于电力系统运行管理控制的能量管理系统（EMS）逐渐成为电网运行的重要技术手段，是电力系统发展的标志性产物之一。

世界多数国家**农村用电**的发展滞后于城市用电和工业用电。19世纪末一些国家开始使用电能，而农村用电一般起始于20世纪二三十年代，有些国家则起始于50年代。多数国家的农村用电是从电力提水灌溉开始的。随着农村经济的发展，农村用电项目逐渐增加，农副产品加工、大田作业、电热育秧与烘干、温室温床、热泵暖房、冷冻贮藏、园艺栽培及畜牧业、养殖业等用电项目逐渐发展。又相继出现为农产品加工和农业生产服务的工业、由城市转移到农村的工业、农村地区小型采矿业及商业等用电类型。中国的农村用电始于20世纪30年代，最初仅限于电力提水灌溉和农村生活照明用电。到1949年，中国农村用电量仅有2000万kW·h，占全国总用电量的0.58%。70年代以后，大力发展电力井灌、高扬程提水灌溉和农村小型工业用电。1998年以来，不断加强农村电网建设，促进了农村电力消费。2010年，农村用电量达9197亿kW·h，占全社会用电量的21.9%。在中国，配电网高速发展的同时也将不断加大农网建设与改造资金投入，解决农村电网与主网架联系薄弱问题，改善农网结构，合理电源点布，提高配电网互供支援能力，提高用户**供电可靠性**。

电能应用与社会发展

电能应用推动了能源密集型生产的发展，促使社会生产进入密集型时代，创造出空前规模的生产力。**电气照明**器具的发明及技术进步，基本垄断了太阳光以外的照明领域；电动机的出现，使**电力拖动**成为社会的主要动力来源；各种电加热炉窑的出现，不但提高了能源利用效率，而且解决了其他冶炼方式无法达到的高温和特殊气氛冶炼条件，提供了金属热处理加工特殊工艺环境；电焊的发明和技术进步，解决了其他**焊接**方式无法解决的焊接质量问题和难熔金属的焊接问题；用电解方法加工提纯高纯度的有色

金属，满足了对其应用质量的要求，食盐电解制出了国民经济发展需要而过去无法取得的重要工业原材料；电气化铁路的应用令电动车组取代蒸汽、内燃机车，实现了陆地运输上的高速度、大运力、高陡度、无污染的运输手段；各种家用电器的发明和技术进步，为人们学习、生活和工作的环境，饮食卫生，居住环境的安全和舒适，仪表美观，文化生活的丰富等创造出了优越的条件。它与电子技术制控手段相结合，为社会生产的技术进步、社会劳动生产率的提高和劳动生产条件的改善提供了广阔的发展前景。它的应用程度（见图4）已成为衡量一个国家工业、农业、科学技术、国防现代化和居民生活水平的重要标志。

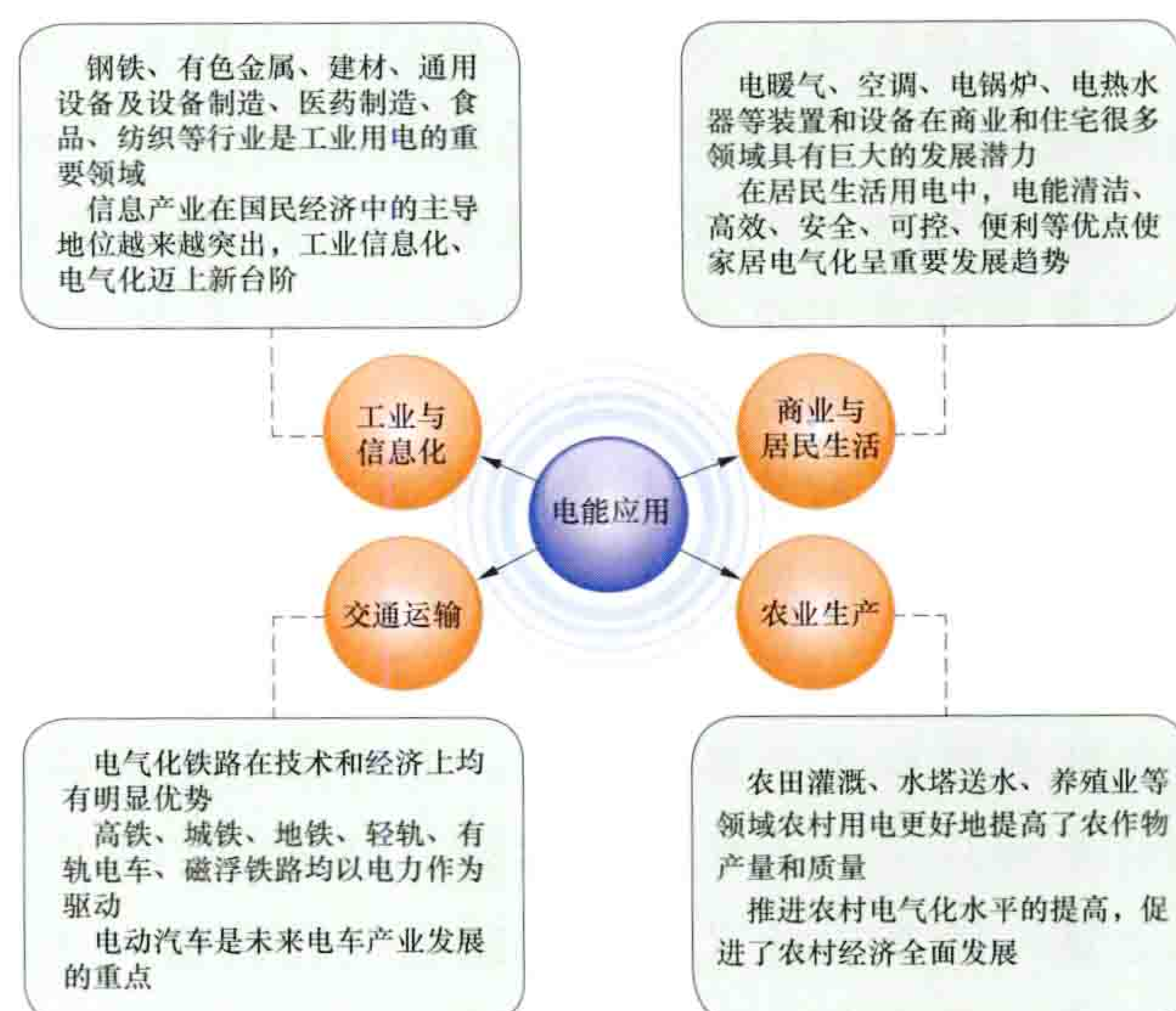


图4　电能——国民经济和居民生活的要素

1. 电能——让生活色彩纷呈

电能应用改变了人类的生活模式。数万年前，人类就已经懂得使用自然之火来御寒、烧烤和照明。照明消除了黑夜对人类生活和生产劳动的限制，大大延长了人类用于创造财富的劳动时间，并且改善了劳动生产条件，丰富了人们的生活。19世纪80年代，T.A.爱迪生预见到电灯的推广将会对社会进步产生巨大影响，亲自组织灯的生产和创办电力公司，增加电力供应，由此开辟了电气照明的新时代。电光源已形成种类众多、形状万千的产品系列。电气照明也不再局限于室内照明，城市景观、人类生产生活都离不开电气照明。

电气照明是人们生活的一部分，家用电器则是现代科学技术发展的产物，它使人们从繁重的家务劳动中解放出来，为人们创造了方便、舒适的生活和工作环境，在饮食、烹饪、衣着、美容、卫生、保健、文化、娱乐等方面，深刻地改变了人们的生活面貌，以电冰箱、空调、吸尘器、洗衣机、电饭煲、电磁灶为代表的家用电器不断提升人们的生活质量，并向智能化、网络化、节能环保等方向发展。智能家居就是以住宅为平台，集合了能满足人们家居生活各方面需求的一系列智能家电或其他产品的居住系统，涉及安防、休息、餐饮、娱乐、通信、健康、卫生、洗浴、垃圾处理等诸多方面的智能化功能。网络家电则是将互联网技术、物联网技术等应用到家用电器中，实现远程控制、远程服务、互联互动并对家用电器的智能化提供网络支持。信息化时代的发展，更需要有高质量、高可靠性的电力提供支撑。

电能应用改变了人类的生产手段。电力拖动是国民经济电气自动化的基础。19世纪末，电动机逐渐代替蒸汽机作为拖动生产机械的原动机。一个世纪以来，电机的基本结构并没有大的变化，而电机的类型却有极大的拓展，其运行性能、经济指标等也有了很大的改进和提高。随着自动控制系统和计算装置的发展，在一般旋转电机的理论基础上又发展出许多种高可靠性、高精度、快速响应的控制电机。中国生产的各种类型的电机不仅能满足国民经济各部门的需要，而且已经达到世界先进水平。

生产的发展，对拖动系统提出了更高的要求，如高的加工精度和工作速度要求电机快速起动、制动和逆转，实现很宽范围内的调速及整个生产过程的自动化等，这就需要有一整套自动控制设备组成自动化的电力拖动系统。随着自动控制理论的不断发展，半导体器件和电力电子技术的应用，以及数控技术和计算机技术的发展与应用，电力拖动系统正在不断地完善和提高。

电能应用改变了人类的交通方式。电力牵引是当今三种牵引动力形式（蒸汽、内燃、电力）之一。世界上第一条试验性电力牵引线路是德国西门子公司和哈尔斯公司于 1879 年 5 月 31 日在柏林建成的。1881 年在法国巴黎国际电工展览会上展出了第一条由架空接触线供电的有轨电车线路。此后，电力牵引迅速在城市交通运输中得到应用。20 世纪初，电力牵引开始应用于干线铁路运输。1964 年 10 月 1 日，日本东海道新干线正式通车，成为世界上第一条真正意义上的高速电气化铁路。中国电气化铁路起步较晚，发展很快。1961 年开通第一条电气化铁路——宝成铁路宝鸡—凤州段；1998 年 8 月建成第一条行车速度达 200km/h 的准高速电气化铁路——广（州）深（圳）铁路；2008 年 8 月建成第一条最高时速达 350km/h 的客运专线——京津城际铁路；2011 年 7 月建成运营速度达 300km/h 的京沪高速电气化铁路。经过 50 年的建设，截至 2013 年底，已建成的电气化铁路营业里程达 5.58 万 km，居世界第二位，电化率达 54.1%。高速电气化铁路以其速度快、运能大、能耗低、污染轻等一系列的技术优势，适应了现代社会经济发展的新需求。高速铁路所用电能均取自公用电力系统，并经专门的牵引供电系统变换成符合电力牵引用电要求的电流、电压，再向**电力机车**或电动车组等供电，可以说，电能是高速铁路的心脏。

电动汽车可以有效减少大气污染和噪声污染。21 世纪以来，在全球气候持续变暖、国际油价不断上升，空气污染日益严重，能源短缺的情况下，电动汽车引起了越来越广泛的关注。一方面，电动汽车能源利用率高，近似零排放，有利于节约能源和减少二氧化碳的排量；另一方面，电动汽车利用夜间向**蓄电池**充电，可以避开用电高峰，有利于电网均衡负荷。2013 年，中国汽车保有量已达 1.37 亿辆，汽车用油占全国汽油消费总量的 85%，大量汽车尾气造成的城市污染给人们的健康带来隐患。为应对能源危机、节约能源、保护大气环境，发展具有节能、环保、高新技术密集等特点的新能源汽车是必然选择。

电动汽车有着悠久的历史。在 1873 年，英国人就研制出了第一辆电动汽车。19 世纪后期欧洲电动汽车的发展处于黄金时代。1900 年美国电动汽车保有量为 15 755 辆，1996 年美国加利福尼亚州修改汽车零排放法规，电动汽车销售比例从 2003 年开始被强行提高。日本 20 世纪 30 年代就开发出了自己的电动汽车，并且投入商业运营。

中国电动汽车重大科技项目的研发始于 2001 年。2003 年，北京、天津、武汉、深圳等 7 个城市先后开展了新能源汽车小规模示范运行考核，累计投入运营车辆超过 500 辆，运营里程超过 1500 万 km，平均故障间隔里程达 3500km 以上，出勤率达 95%以上。2008 年北京奥运会期间，集中投入了 595 辆自主研发的混合动力、纯电动及燃料电池汽车，累计运行 370 万 km 以上，运送乘客 440 多万人次，实现奥运会历史上最大规模的电动汽车示范运行。

可以预见，电动汽车作为当今世界重点研究的战略性新兴产业，随着科技的进步，必将为国民经济的持续发展和人民生活质量的提高发挥巨大作用。

2. 电能——承载并推动工业革命

能源是人类生存和发展的物质基础。近200多年来，人类社会已经先后经历了两次工业革命。纵观工业文明的发展历程，有一个突出特征，就是能源变革对工业发展具有决定性、全局性影响，推动着工业文明不断向更高层次和水平演进。

始于18世纪中期的第一次工业革命，由于蒸汽机的发明与广泛应用，煤炭迅速取代柴薪，推动了近代工业的建立和大发展。在这次变革中抢占先机的英国，从1770～1860年的90年中，建立了世界上规模最大的煤炭工业，到19世纪中期，英国煤炭产量已占全球的2/3以上，并以此为基础加快发展近代纺织、钢铁、机械、铁路运输等工业，率先在世界上建立近代工业体系。

始于19世纪中后期的第二次工业革命，由于电力的发明及广泛应用，推动了现代工业的建立和大发展，不仅产生了电力、电器、石油、化工、汽车、通信、信息等新的工业部门，而且推动了纺织、钢铁、机械、铁路运输等旧的工业部门升级。在这次变革中抢占先机的美国，从1910～2010年的100年中，电力装机容量、用电量、电网规模一直位居世界第一，美国也率先在世界上建立现代工业体系。如今电能已成为全球最重要的能源之一，从全球范围看，以电为中心的能源开发利用格局正在加快形成，并成为全球能源发展的战略方向。1980～2012年，全球电力消费增长200%左右，而石油、天然气、煤炭消费只分别增长40%、130%、110%左右，全球一次能源用于发电的比重从30%提高到40%左右，电能占终端能源消费的比重从10%上升至20%左右。

从两次工业革命可以看出：能源变革对工业发展具有决定性的影响，没有蒸汽机技术的突破，就不会有近代工业；没有电力的广泛应用，现代工业也无从谈起。同时能源变革对工业发展又具有全局性的影响，既推动新的工业行业出现，也推动旧的工业行业升级。进入21世纪后，大规模开发利用化石能源带来的能源危机、环境危机凸显，于是以电为中心、以新能源大规模开发利用为特征的能源变革兴起。2000～2012年间，全球风电、太阳能发电装机容量由1793万、140万kW增长到2.8亿、1亿kW，分别增长了15.62倍和71.43倍。随着新一轮能源变革的到来，新能源技术、智能技术、信息技术、网络技术不断突破，与智能电网全面融合，正在承载并推动第三次工业革命。新一轮能源变革与新一轮工业革命再次相伴发生，这不是历史的巧合，而是因为能源变革是工业革命和工业发展的根本动力。第三次工业革命必然建立在可持续供应的能源基础上。

电能广泛应用，必须依靠电网来实现。1886年，美国西屋电气公司建成了世界上第一个交流输电系统，从此世界电网遵循电压等级由低到高、联网规模由小到大、配置能力由弱到强、自动化程度越来越高的客观规律快速发展，并可划分为三个阶段。初级电网阶段（从19世纪后期到20世纪中期）：主要是基于早期控制技术、小机组发电技术，以低电压、弱联系为特征，以城市或局部区域电力配置为主的小型孤立电网。互联电网阶段（从20世纪中期到20世纪末）：主要是基于现代控制技术、大机组稳定发电技术、大规模远距离输电技术，以高电压、强互联为特征，具有全国或跨国电力配置能力的大型同步电网。智能电网阶段（从21世纪初开始）：基于新能源技术、分布式发电技术、大规模储能技术、超远距离超大容量输电技术、信息网络技术和智能控制技术的快速发展，世界电网进入智能电网发展阶段。

电能，作为第三次工业革命载体的二次能源，正引领着人类向新电气化时代迈进。

配电与用电

电力技术是由发电、输电、**配电**和用电等环节组成的电能生产、传输、分配和消费系统的各相关技术的集合。**配电网**是从电源侧（输电网和发电设施）接受电能，通过配电设施就地或逐级分配给各类用户的电力网络。配电系统作为电力系统到用户的最后一环，与用户的联系最为紧密，对用户的影响也最为直接。用电则是电力生产活动的最终目的。

为了保证**供电质量**和供电安全，首先要清楚电能的两个特点：①电能以光速传播，至今未实现工业规模储存，因此，电能的产生与消费几乎在同一瞬间完成。②发电和用电之间必须实时保持供需平衡，否则，会危及用电的安全性、连续性及电能质量。电能的这种高度同步性特点，必须通过电源、电网、用户的协调运作共同保障电力安全和电能质量。其中，作为传输、配送电能的网络——电网，处于枢纽地位，它连接若干分散的电源和用户。电能安全和质量必须通过电网的调度、运行和控制来完成，电网作为能源供应体系的核心，是现代经济发展和社会进步的重要基础和保障。

1. 配电与配电技术

电能作为一种商品，需要通过运输再供给用户使用。说到运输，就要提到电力系统一个基本概念——电压等级。在国外，**配电网电压等级**通常包括 0.4/3.3/6.3/10/22/33/63/77/110/154/187kV 等。由于每个国家的具体情况不同，随着经济建设及工业化程度的发展，各国根据各自经济发展情况、技术水平、制造能力、对外政策以及国际交往能力的不同，分别建立了不同电压等级的配电网。在中国，110kV 电压等级以下电网称为配电网。110（66）、35kV 属于高压配电网；10kV 属于中压配电网，个别地区使用 20kV 和 6kV；380/220V 属于低压配电网。在负荷密度大的一些城市电网中，220kV 电压兼有高压配电功能。根据供电地域特点或服务对象的不同，配电网可以分为**城市配电网**与**农村配电网**。如果把中国电力网络比作公路网，那么高压输电网相当于省际高速路，城市配电网、农村配电网便相当于城区道路、农村道路，公路上运行的汽车便是电网中输送的电能。

配电系统是配电网及其二次系统组成的整体，配电网从输电网或地区发电厂与分布式电源接收电力，就地或逐级向各类用户供给和配送电能，二次系统完成配电网的测量、保护与调节、控制等功能，包括继电保护系统等。配电系统对供电质量水平有着决定性的影响。配电系统直接与用户连接，系统中任何故障、扰动都直接影响对用户的供电质量。国内外统计数据均表明，中低压配电网引起的停电时间占用户总停电时间的比例超过 80%。配电网络接线形式种类多，运行方式多变。受城乡市政建设、发展的影响，配电元件与网络结构变动频繁，异动率高。配电系统是城乡市政设施的组成部分，分布在人类活动频繁的区域，易受外界干扰、人为破坏，故障率高，是输电线路故障率的数十倍甚至上百倍。配电系统管理业务综合性很强，不像输电系统管理那样有着很细的专业分工。随着分布式电源的大量接入，传统上只是单向接收输电网电力的配电网，将转变为功率双向流动的有源网络，这些给配电网的规划建设与经营带来新的挑战，增加了配电网保护、控制、运行调度与管理的复杂性。

配电技术主要包括规划技术、设备制造技术、检修技术、继电保护与控制技术、电能质量控制技术、配电自动化技术、**分布式电源并网技术**等。

规划技术是支撑配电网规划的技术措施。包括负荷预测技术、计算机辅助分析与设计技术等。(见**配电网规划**)

配电设备制造技术的发展方向是小型化、低损耗、免维护与智能化。主要的配电设备包括断路器、负荷开关、导线、电缆、配电变压器等。

检修技术是支撑配电网设备检修的技术措施。主要包括配电网设备在线监测技术、**配电网不停电作业**技术等。(见**配电网设备检修**)

继电保护与控制技术是支撑配电网继电保护与控制的技术措施。

电能质量控制技术是应用电力电子和控制技术实现电能质量控制与改善的技术措施。利用**静止无功补偿装置**、**静止同步补偿器**、动态电压恢复器、**固态开关**等柔性配电设备,对**谐波**、**电压波动和闪变**、**电压暂降**与暂升等电能质量的指标进行控制,使其维持在符合技术标准要求的范围内。

配电自动化技术是支撑配电网运行自动化、管理自动化和信息化的技术。利用现代计算机与通信技术,将中低压配电网的实时运行、电网结构、设备、用户以及地理图形等信息集成,实现其运行监控与管理的自动化与信息化,主要包括馈线自动化技术、运行自动化技术、管理自动化技术、系统集成技术等。配电自动化技术是提高配电网运行、管理水平的重要手段,其作用包括提高供电可靠性、配电网容量利用率、电能质量、用户服务质量、管理效率以及降低线损等方面。高级配电自动化满足了**有源配电网**运行监控与自动化的需要,是配电自动化技术的未来发展方向。

分布式电源并网技术是分布式电源接入配电网以及保证含分布式电源配电网安全可靠运行、电能质量合格的技术措施。分布式电源在世界范围内迅速发展,正在给电力技术带来一场深刻的变革。满足可再生能源发电与分布式电源并网的需要,是智能电网提出并获得迅速发展的重要原因。智能配电网不再被动地限制分布式电源接入的容量,而是从有利于发挥分布式电源的作用、节省整体投资出发,广泛应用主动网络管理技术,最大限度地接纳分布式电源,实现配电网的优化运行。

2. 用电与用电安全技术

人类社会已经形成以电力为主要能源的庞大生产力。尽管新的一次能源不断涌现,这些新的一次能源要像核能一样转换为电能才能被社会所利用,在相当长的时期内以电作为能源是难以被替代的。现代社会已进入电气化时代,电能成为社会必需品,一旦失去电能,社会生产无法进行,高速运行的社会流通领域无法运转,信息系统中断,居民的正常生活秩序难以维持。

从发达国家的发展历程看,伴随着经济社会的发展,电气化水平也处于一个不断提高的过程。电气化水平与一个国家的经济发展水平密切相关,经济发达程度越高,其电气化水平也就越高。主要发达国家人均国内生产总值(gross domestic product,GDP)与人均用电量的变化关系见图5,虽然各国资源状况、气候条件和生活习惯各不相同,电

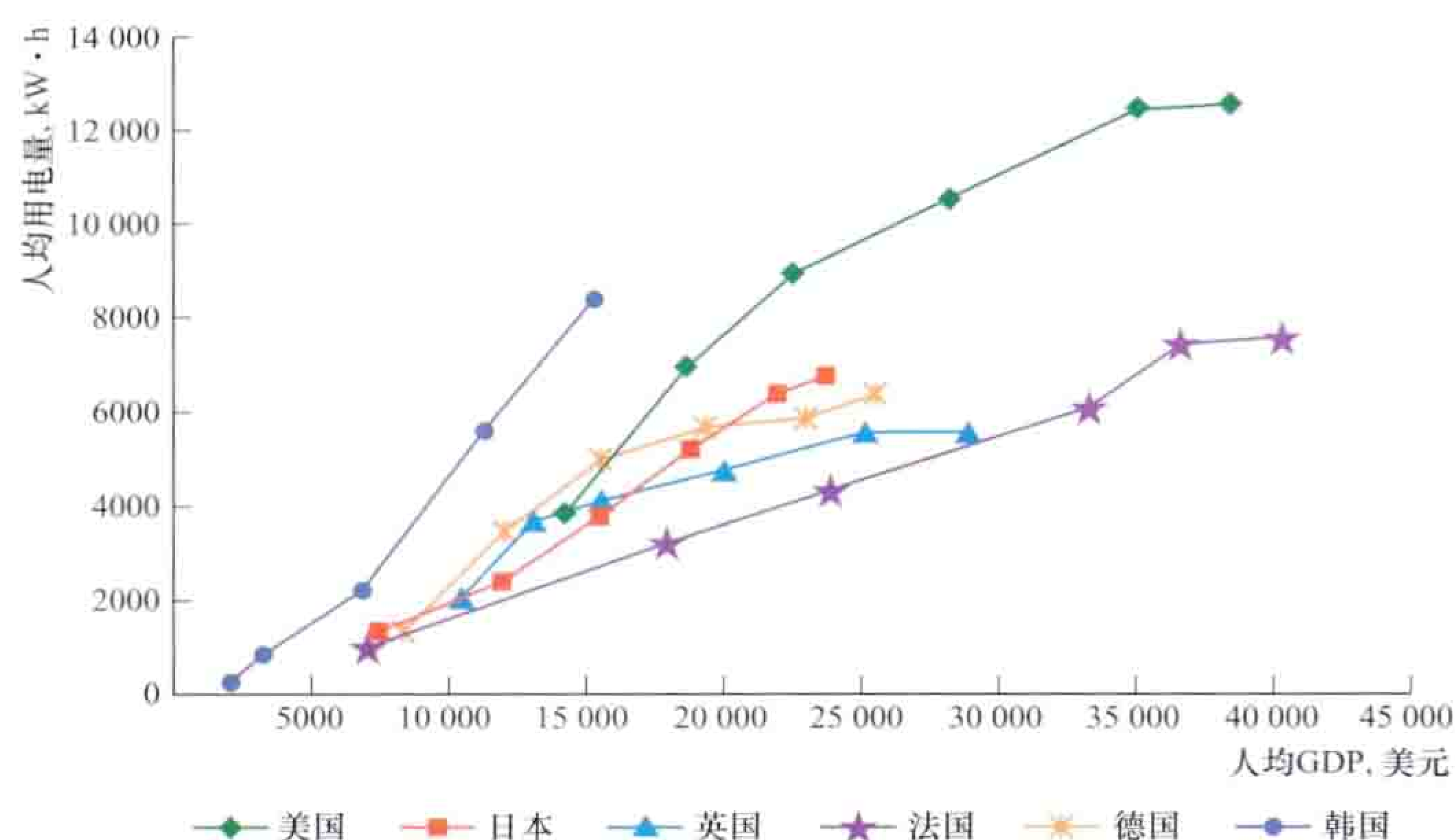


图 5 主要发达国家人均 GDP 与人均用电量的变化关系趋势图[1]
（数据来源：根据国际能源署统计资料计算整理）

力发展进程具有不同特点，但从图中可以看出，人均 GDP 与人均用电量基本呈正相关关系。2011 年一些国家人均年消费电量见表。

电在给人类带来数不尽的好处之时，它骄傲的力量也提醒人们要注意安全用电。触电可造成人身伤亡，设备漏电产生的电火花可能酿成火灾、爆炸等安全事故，不仅会危害人们的人身安全，而且还会带来巨大的经济损失和社会影响。因此应安全使用电能，防止发生用电事故。安全用电的原则是不接触低压带电体，不靠近高压带电体。在日常生活中，人们还应认识了解电源开关，学会在紧急情况下关断电源；不用手或导电物（如铁丝、钉子、别针等金属制品）去接触、探试电源插座内部；不用湿手触摸电器，不用湿布擦拭电器；电器使用完毕后应拔掉电源插头，插拔电源插头时不要用力拉拽电线，以防止电线的绝缘层受损造成触电；电线的绝缘皮剥落，要及时更换新线或者用绝缘胶布包好；发现有人触电要设法及时关断电源或者用干燥的木棍等物将触电者与带电的电器分开，不要用手去直接救人；不随意拆卸、安装电源线路、插座、插头等。

2011 年一些国家人均年消费电量（kW·h）

国　家	人均年消费电量	国　家	人均年消费电量	国　家	人均年消费电量	国　家	人均年消费电量	国　家	人均年消费电量
加拿大	16 406	美　国	13 227	日　本	7847	韩　国	10 162	俄罗斯	6533
瑞　典	14 029	法　国	7318	德　国	7083	英　国	5518	意大利	5939

资料来源：国际能源署《世界能源关键数据统计 2013》。

3. 电力营销与需求侧管理

电力营销在不断变化的电力市场中，以电力客户需求为中心，通过供用关系，使电力客户能够使用安全、可靠、合格、经济的电力产品，并得到满意周到的服务。中国与世界上多数国家一样，电力营销都经历了以加强经济手段、改善服务质量来激励电力客户优化用电方式，降低电力企业发供电成本，降低销售电价，扩大销售市场，实施**需求侧管理**，提升客户服务水平等过程。早期，中国采用两部制电价、**功率因数调整电费**等手段激励电力消费者配合电力企业降低发供电成本。之后，中国采用计划用电的行政办法以实现电力与国民经济发展的动态平衡。随着中国经济体制改革的深化和市场经济的发展，以行政手段限制用电的办法逐步消除，峰谷电价、季节性电价等经济激励手段在中国得到推广应用。20 世纪 90 年代以来，为电力消费者提供可靠的电能和优质服务，开拓售电市场，实施需求侧管理，电力营销的内涵及工作内容得到不断发展、充实与更新。

[1] GDP 按照 2000 年不变价美元折算。

电力需求侧管理是指在政府法规和政策的支持下，采取有效的激励和引导措施以及适宜的运作方式，通过发电公司、电网公司、能源服务公司、社会中介组织、产品供应商、电力用户等共同协力，提高终端用电效率和改变用电方式，在满足同样用电功能的同时减少电量消耗和电力需求，达到节约资源和保护环境，实现社会效益最好、各方受益、最低成本能源服务所进行的管理活动。这种管理是国家通过政策措施引导用户高峰时少用电，低谷时多用电，提高供电效率、优化用电方式的办法。

智能用电将开启更美好的明天

电能生产更环保、更绿色、更智能。分布式发电所使用的能源大多属于绿色可再生能源，可以减少有害物的排放总量，减轻环保压力；就近供电减少了大容量远距离高电压输电线的建设，也减少了高压输电线的线路走廊和相应的征地面积。

将分布式发电系统以微电网的形式接入到大电网并网运行，可节约成本，减少对大电网的冲击，微电网与大电网相互支撑，是发挥分布式发电供能系统效能的最有效方式。

相对于微电网，智能配电网则是站在地区电网全局的角度来考虑未来系统中的各种问题，它具有完善的通信功能和更加丰富的商业需求。智能配电网将使配电网从传统的供方主导、单向供电、基本依赖人工管理的运营模式向用户主动参与、功率双向流动、高度自动化的方向转变。智能配电网与传统的配电网相比，具有自愈能力强、安全性高、电能质量稳定的特点。同时作为区别于传统配电网的重要特征，智能配电网支持分布式能源资源（DER）的“即插即用”，并通过优化调度实现对各种能源的优化利用。它还支持与用户间的互动，主要体现在两个方面：一是应用智能电表，实行分时电价、动态实时电价，让用户自行选择用电时段，在节省电费的同时，为降低电网高峰负荷作贡献；二是允许并积极创造条件让拥有DER（包括电动汽车充放电）的用户在用电高峰时向电网送电。此外，大力发展电动汽车对降低各国原油生产，减少城市地区PM2.5等环境污染物排放，提高生活品质都具有重要意义。

可以说，分布式发电技术和微电网技术推动了智能配电网的发展。当前，智能电网在世界范围内的研究与建设都还处于起步阶段，一些发展较好的国家或地区也大多仅完成了智能表计的铺设。而以往中国的配电网建设投资远小于发电和输电系统，智能电网技术在配电网层面将有更大的作为。准确把握智能电网技术的发展方向有利于提高中国电力工业的自主创新能力与技术装备水平。因此，应站在智能配电网的高度统领分布式发电技术与微电网技术的发展。

电能应用更安全、更可靠、更高效。先进的通信、信息和控制技术与能源生产、运输、消费各环节的综合，使电能的应用更安全、更可靠、更高效。

通过需求侧管理调整售电价格机制，引导用户的用电行为，更加高效地利用电能，高效地利用发电、输电和配电设备，全面提高电力行业的投资效率，降低成本，提升发电、输配电和用户之间的资源优化配置水平。相对于传统电力管理方式，需求侧管理通过减少或推移需求来平衡电力供需矛盾，延缓新电站及变输配电设施的建设，达到节约能源的目的。

科技的发展（见图6）使配电网成为当前电网建设的热点，无论是大型城市还是中小型城市，都把电网改造建设及自动化的实施列入工作重点。未来配电网建设将根据不

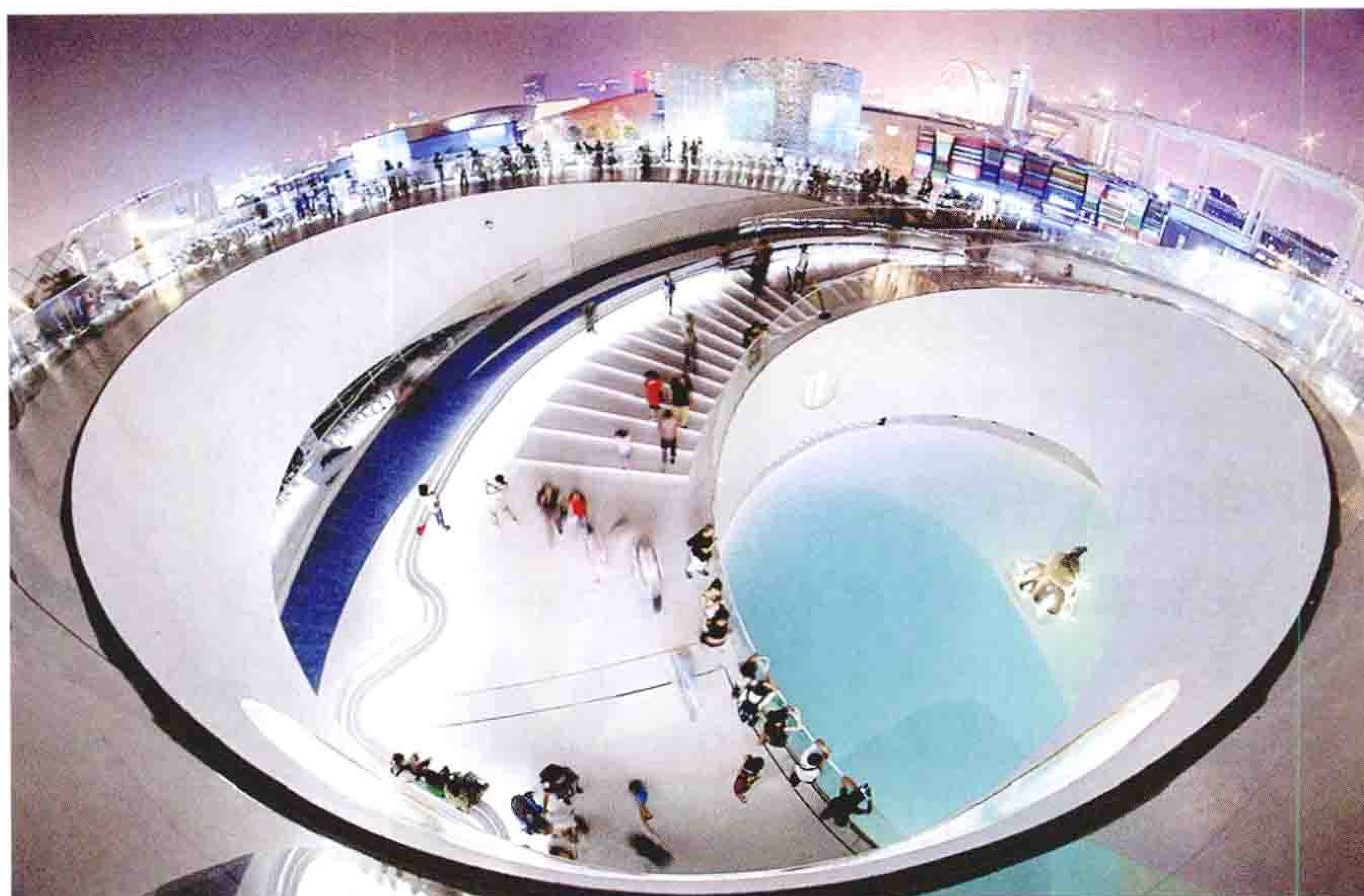


图 6　电能应用将开启更美好的明天（李蓥鑫　摄）

同区域的经济社会发展水平、用户性质和环境要求等情况，采用差异化的建设标准，合理满足区域发展和各类用户的用电需求。

以电为中心转变能源开发利用方式，已成为全球能源发展的战略方向，今后的能源变革都将围绕更清洁更经济的发电、更安全更高效的配置、更便捷更可靠的用电展开，由可再生能源转换而来的电能全面取代化石能源只是时间问题。

电能应用的智能化，将使电能生产供得出、送得到，将让用户连续用、随意用，将为人类创造更多的需求，并满足需求。

中国 2010 年上海世界博览会的主题是“城市，让生活更美好”。假如没有电能，城市的光辉将荡然无存，正是电能的应用点亮了城市，点亮了生活，电能应用将开启更美好的明天。

·用 电 卷·

第一版前言

用电是电力部门各项生产活动的最终目的。装在用户侧种类繁多的用电设备，是电力系统的一个组成部分并按照发电、供电、用电瞬间同时完成的规律，处于相互动态平衡中。用电卷从电能转换为各种有用能为纲目，介绍各种用电设备的转换技术及其应用的知识并从沟通供用电双方技术、业务衔接的目的出发，介绍电力部门业务管理方面的知识。

用电知识各分支介绍

用电卷为了尽量覆盖纷繁行业中的用电知识，设置了以下9个分支：

一、用电概论分支介绍宏观方面的用电知识，国民经济各行业的用电特征，用电常用技术术语概念。

二、用电管理分支介绍维护供、用电双方正常秩序和权益的知识和相应技术术语概念；介绍具有中国特色的社会计划用电、节约用电、安全用电管理知识。

三、用户低压配电及安全用电技术分支介绍各种通用低压配电器具装置的技术知识和用户安全用电技术知识。

四、电气照明分支介绍照明的常用技术术语概念，各种电光源，照度标准及应用照明类别以及照明控制的知识。

五、电气传动分支介绍各种电动机特性及其起动、调速、制动、保护及其控制系统知识，以及典型负载工作特性知识。

六、电加热及电焊分支介绍各种电加热方式和设备的加热原理及应用知识，以及各种电气焊接的原理及应用知识。

七、电化学分支介绍电化学中常用技术术语概念、电解原理和各种实用电解应用知识；各种电化学加工知识；各种化学电源知识；通过整流取得直流电源知识介绍。

八、电力牵引分支介绍电气铁道及其他电力牵引车辆牵引系统的各种供电方式和技术装备知识；保障运行安全的铁道信号系统知识。

九、家用电器及其他分支介绍各种家用以及办公、医疗、娱乐等类似电气设备及其控制的基本知识。

用电卷与其他卷的分工与衔接

用电卷与其他卷的分工原则上以用户围墙为界，围墙内用电知识由本卷介绍，但从电力百科全书各卷衔接避免过多重复考虑，做了以下调整：

一、高压供电设施和通用高压电器设备，由输电与配电卷统一介绍，高压用户内部的这类装置知识，请从该卷查阅。

二、用户自备电厂知识，由火力发电卷统一介绍。

三、各类继电保护，属于电力系统的，由电力系统卷统一介绍；属于用电设备本身保护的，由本卷介绍。

用电卷（第一版）编审委员会

1994年6月

•用 电 卷•

第二版前言

《中国电力百科全书·用电卷》（第一版）于1995年出版以来受到全国电力系统和广大读者的好评，它在普及用电知识，促进合理用电，提高安全用电水平和终端用电效率等方面发挥了很好的作用。

随着世界各国科学技术的发展和管理体制的变革，中国电力工业在90年代得到快速发展，到1999年底，全国电力装机容量达到2.98亿kW，年发电量达到12 331亿kW·h，发电装机容量和发电量已居世界第二位，标志着中国已进入世界电力生产和消费大国的行列。90年代中国电力消费市场进一步开放，电力法制化建设进一步得到加强，电力消费的管理模式和使用技术也都有很大的发展。为如实记录和真实反映用电领域知识的变化，按照《中国电力百科全书》（第二版）编委会确定的原则，对《中国电力百科全书·用电卷》（第一版）进行了修订，在第一版的基础上"删繁就简，增补更新，精益求精"，努力把20世纪90年代以来在用电管理和用电新技术方面的知识编纂进来，力求《中国电力百科全书·用电卷》（第二版）能反映时代特征，具有新的知识内容，做到开卷有益，方便读者。

《中国电力百科全书·用电卷》（第二版）的编纂工作邀集了电力系统内外近百位专家和学者参与。这些专家和学者以高度的责任感和使命感，以他们丰富的经验和广博的学识，认真收集资料，仔细整理并反复推敲每个条目的释文内容，用两年的时间，完成了《中国电力百科全书·用电卷》（第二版）的修订、编纂工作。

《中国电力百科全书·用电卷》（第二版）内容做了如下调整、增补和修改：

1. 新增"农村用电"分支。中国是一个农业大国，中国的农村用电有独具特色的管理模式和丰富的内涵知识。为真实地记录和反映中国农村用电知识，经《中国电力百科全书》（第二版）编委会研究决定，在《中国电力百科全书·用电卷》（第二版）增设"农村用电"分支，将第一版中有关农村用电的条目和释文内容调整归并在"农村用电"分支，并按其知识内容范畴确立并新增25个新条目。

2. 根据中国电力法制化建设的实际情况，《中华人民共和国电力法》已于1995年12月28日颁布实施，与其配套的《电力供应与使用条例》和相关的行政规章都已出台执行。为普及用电的法律知识，增强读者的法制意识，在修订中依法对与用电市场行为有关的条目和释文内容做了增补更新。

3. 新增了90年代出现的新的用电技术（如需求侧管理技术、电蓄能技术等），新的照明技术（如城市夜景照明、绿色照明等），新的电力调整、控制技术（如交流电动机软起动等）和新的电器设备（如微波硫灯、负荷隔离开关等），共新增近70个条目。

4. 重新对《中国电力百科全书·用电卷》（第一版）条目释文和彩图进行审核，依据知识更新变化的状况，对条目释文内容做了修改，大改和重写了100余条，小改了300余条，更新彩图100余幅，使第二版的知识内容更趋近于20世纪世界和中国的实际。

用电卷（第二版）编审委员会

2000年9月

目　录



anquan dianya

安全电压 (safety voltage) 不致危及人身安全的电压。为防止人身电击事故，采用由特定电源供电的电压系列。这个系列的上限值为在任何情况下，加在身体不同部位之间的电压不得超过交流有效值50V或直流36V。

安全电压是制定安全措施和进行保安设计的依据，在保证安全的前提下尽可能提高经济性是合理确定安全电压的原则。安全电压值取决于人体的电阻和人体允许通过的电流。中国国家标准规定安全电压额定值的等级为42，36，24，12，6V，应根据使用环境、使用方式、作业现场、操作人员条件、线路状况等因素选用。安全电压等级见表1。

表1 安全电压等级

安全电压（交流有效值）		选用举例
额定值（V）	空载上限值（V）	
42	50	有触电危险的场所使用的手持式电动工具等
36	43	矿井、多导电粉尘等场所使用的行灯等
24	29	供某些人体可能触及的带电设备选用
12	15	
6	8	

确定了通过人体的允许电流，就可以根据人体电阻确定一个对应的安全电压值。在触电电源能自动消除时，允许电流 $I_y \leqslant 165/\sqrt{t}$ (mA)，其对应的安全电压随时间变化而变化。如大接地电流系统的接触电压和跨步电压的允许值，即是按以上原则确定的。

在触电电源不能自动消除时，考虑到人所处的环境不同，触电时的危险性不同，中国又规定了4种不同接触状况下的安全电压值，见表2。

为确保人身安全，供给安全电压的特定电源，除采用独立电源外，供电电源的输入电路与输出电路必须实行电气上的隔离。工作在安全电压下的电路必须与其他电气系统和与之无关的可导电部分实行电气上的隔离。当电气设备采用24V以上的安全电压时，必须采取防止直接接触带电体的保护措施，其电路必须与大地绝缘。

表2 不同接触状况下的安全电压值

类别	接触状况	通过人体允许电流（mA）	人体电阻（Ω）	安全电压（V）
第一种	人体大部分浸于水中的状态	5	500	<2.5
第二种	人体显著淋湿状态，人体一部分经常接触到电气装置金属外壳和构件物的状态	50	500	<25
第三种	除一、二两种状态外，对人体加有接触电压后，危险性高的状态	30	1700（接触电压为50V时的人体电阻）	<50
第四种	除一、二两种接触以外的情况，对人体加有接触电压后，危险性低或无危险性的情况	不规定		无限制

anquan juli

安全距离 (safety distance) 人与带电体、带电体与带电体、带电体与地面（水面）、带电体与其他设施之间需保持的最小距离，又称安全净距、安全间距。安全距离应保证在各种可能的最大工作电压或过电压的作用下，不发生闪络放电，还应保证工作人员在对电气设备进行巡视、操作、维护和检修时的绝对安全。各类安全距离在安全规程中均有规定，见表1～表5。当实际距离大于安全距离时，人体及设备才安全。安全距离既用于防止人体触及或过分接近带电体而发生人体触电，也用于防止车辆等物体碰撞或过分接近带电体以及带电体之间发生放电和短路而引起火灾和电气事故。安全距离分为线路安全距离、变配电设备安全距离和检修安全距离。

线路安全距离指导线与地面（水面）、杆塔构件、跨越物（包括电力线路和弱电线路）之间的最小允许距离。

变配电设备安全距离指带电体与其他带电体、接地体、各种遮栏等设施之间的最小允许距离。

检修安全距离指工作人员进行设备维护检修时与设备带电部分间的最小允许距离。检修安全距离可分为设备不停电时的安全距离、工作人员正常活动范围与带电设备的安全距离、间接带电作业时人体与带电体间的安全距离。

表1 在带电线路杆塔上工作与带电导线最小安全距离

电压等级（kV）	安全距离（m）	电压等级（kV）	安全距离（m）
10及以下	0.7	750	8.0
20、35	1.0	1000	9.5
66、110	1.5	±50	1.5
220	3.0	±500	6.8
330	4.0	±660	9.0
500	5.0	±800	10.1

注：1. 表中未列电压等级按高一级电压等级安全距离。
2. 750kV数据按海拔2000m校正，其他等级数据按海拔1000m校正。

表 2　邻近或交叉其他电力线工作的安全距离

电压等级 (kV)	安全距离 (m)	电压等级 (kV)	安全距离 (m)
10 及以下	1.0	750	9.0
20、35	2.5	1000	10.5
66、110	3.0	±50	3.0
220	4.0	±500	7.8
330	5.0	±660	10.0
500	6.0	±800	11.1

注：1. 表中未列电压等级按高一级电压等级安全距离。
2. 750kV 数据按海拔 2000m 校正，其他等级数据按海拔 1000m 校正。

表 3　与架空输电线及其他带电体的最小安全距离

电　压 (kV)	最小安全距离 (m)	电　压 (kV)	最小安全距离 (m)
<1	1.5	220	6.0
1～10	3.0	330	7.0
35～66	4.0	500	8.5
110	5.0		

注：1. 表中未列电压等级按高一级电压等级安全距离。
2. 表 1～表 3 资料来源：GB 26859—2011《电力安全工作规程　电力线路部分》。

表 4　设备不停电时的安全距离

电压等级 (kV)	安全距离 (m)	电压等级 (kV)	安全距离 (m)
10 及以下	0.7	750	7.2
20、35	1.0	1000	8.7
66、110	1.5	±50 及以下	1.5
220	3.0	±500	6.0
330	4.0	±660	8.4
500	5.0	±800	9.3

注：1. 表中未列电压等级按高一级电压等级安全距离。
2. 13.8kV 执行 10kV 的安全距离。
3. 750kV 数据按海拔 2000m 校正，其他等级数据按海拔 1000m 校正。

表 5　人员工作中与设备带电部分的安全距离

电压等级 (kV)	安全距离 (m)	电压等级 (kV)	安全距离 (m)
10 及以下	0.35	750	8.00
20、35	0.60	1000	9.50
66、110	1.50	±50 及以下	1.50
220	3.00	±500	6.80
330	4.00	±660	9.00
500	5.00	±800	10.10

注：1. 表中未列电压等级按高一级电压等级安全距离。
2. 13.8kV 执行 10kV 的安全距离。
3. 750kV 数据按海拔 2000m 校正，其他等级数据按海拔 1000m 校正。
4. 表 4 和表 5 资料来源：GB 26860—2011《电力安全工作规程　发电厂和变电站电气部分》。

anquan zhaoming bianyaqi

安全照明变压器　(transformer for safe lighting)　能取得安全照明灯用电压的降压变压器，又称行灯变压器。安全照明变压器主要用作携带式作业灯、隧道照明灯、高度低于 2.5m 的公共场所及机床设备局部照明灯用电源，也可作为某些潮湿阴暗或带电操作有危险的工作场所的电动工具的电源。

安全照明变压器电压等级分为 42，36，24，12，6V。安全照明变压器工作原理与普通变压器一样，在结构上，其一、二次绕组之间，一次绕组与地之间都具有良好的绝缘，一、二次绕组之间不允许发生直接的电气联系，即不允许在一次绕组中用抽头降压的方法取得安全电压。安全照明变压器上设置接地端子（见接线端子），使用前应先接地以确保用电安全。

anniu

按钮　(push button)　一种用人工操作，并具有储能（弹簧）复位功能的主令电器。按钮主要用于发布操作命令，接通或分断控制电路，控制电气与机械设备的运行。

按钮由按钮帽、复位弹簧、桥式触头和外壳等组成，带有动合和动断触头，通常做成复合式，即同时具有动断触头和动合触头。按下按钮时，先断开动断触头，后接通动合触头；按钮开释后，在复位弹簧的作用下，按钮触头自动复位的先后顺序相反。还有一种自持式按钮，按下后即可自动保持闭合位置，断电后才能打开。触头接通时电路接通，触头断开时电路也被分断。按钮的形状通常是圆形或方形，采用积木式拼接装配结构，触头数量可根据需要任意拼接，最多可达 6 动合和 6 动断；也可通过多个元件的串联增加触头对数。按钮的结构原理和图形符号如图 1 所示。

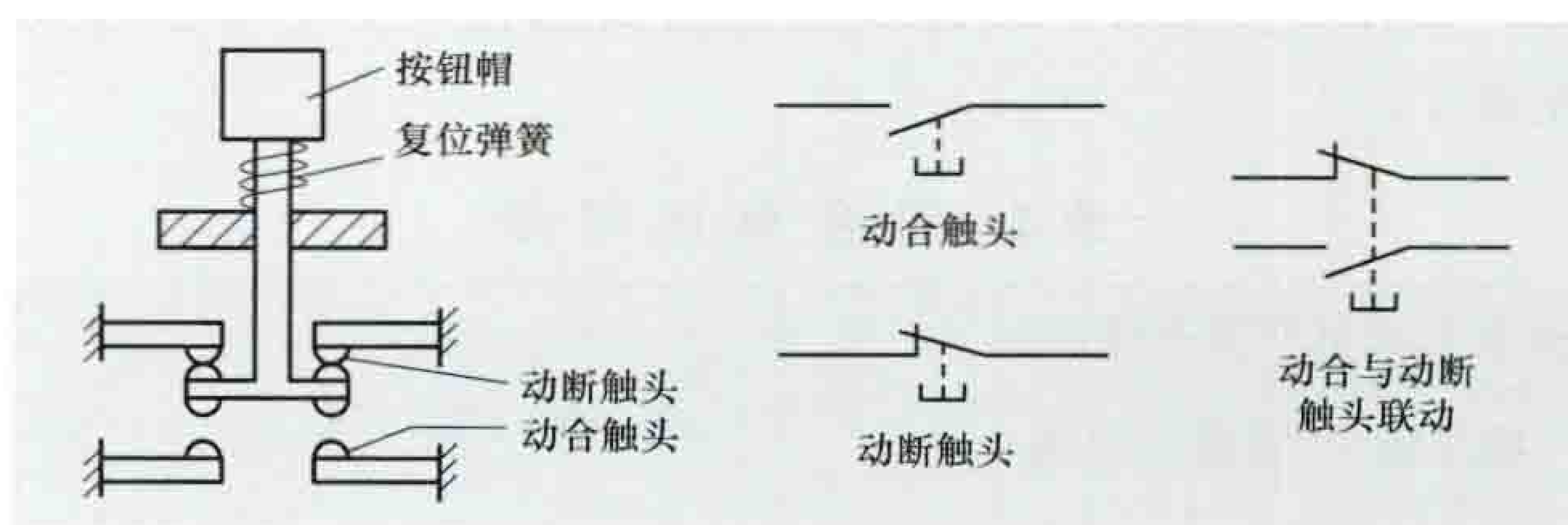


图 1　按钮的结构原理和图形符号

按钮的种类很多，按功能分为起动按钮（绿色）、停止按钮（红色）、复位按钮（用于联锁控制电路中）、检查按钮、控制按钮、限位按钮等。按钮的用途极广，如车床的起动与停机、正转与反转，吊车的起动、停止等。微型按钮用于小型半导体收音机、遥控器、验钞器等产品。紧急求救按钮见图 2。不同类型的按钮见图 3。



图 2　紧急求救按钮



图 3　不同类型的按钮



baichideng

白炽灯 (incandescent lamp)　电流加热灯丝至白炽状态而发光的电光源。白炽灯是一种热辐射光源。其缺点是能量的转换效率很低，但因其具有显色性好、光谱连续、无频闪、使用方便等优点，曾被广泛应用。

白炽灯的外形及一般结构如图 1 所示。它主要由灯丝、玻壳和灯头等组成。灯丝通常为钨丝，可绕成单螺旋，也可绕成双螺旋，并经过内、外导线封入玻壳内。内、外导线从灯头导入电流给灯丝，同时又起支撑灯丝的作用。灯的内导线一般使用镀镍铜丝或镀镍铁丝。在芯柱的封接部分，使用杜美丝。普通照明灯有两根外导线，其中一根使用康铜丝，作熔丝用；另一根使用铜丝。玻壳使用钠系透明玻璃，用吹泡机吹制成型。为了降低发光体表面亮度造成的眩光，在玻壳的内表面，用氢氟酸进行化学处理，即内磨砂；也可在玻壳的内表面涂以白色的无机粉末，以提高灯的柔光性能；有些灯泡做成反射型的，在玻壳内上半部蒸镀一层反光铝膜。电流经过灯丝，使灯丝加热，温度可达 2300K 以上。灯丝的温度越高，灯的发光效率和色温也越高。但是在高温下，灯丝容易气化而降低灯的寿命。为了减缓灯丝的气化速率，在灯泡内充入压力约为 9.3×10^{3} Pa 的惰性气体氩气（Ar）和氮气（N_2）。氩气和氮气的混合比例由额定电压和灯丝温度来决定。如果充入比氩气原子量更大、热导率更低的氪气（Kr），减缓灯丝气化速率的作用将更大。

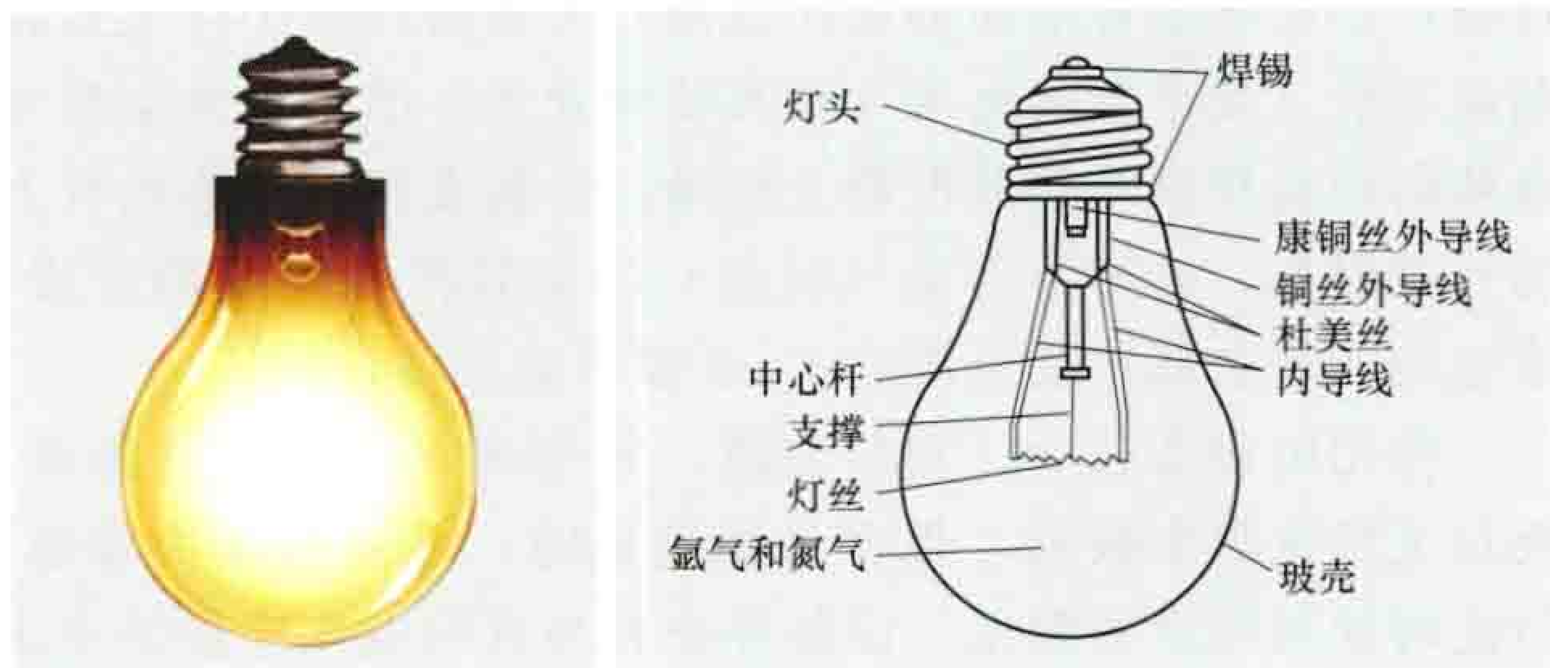


图 1　白炽灯的外形及一般结构

白炽灯的能量特性可以用发光效率来描述。白炽灯所消耗的能量中只有一小部分转换为可见辐射光，很大一部分转换为红外线或被损失掉。白炽灯的发光效率在 13%左右。

白炽灯的灯丝温度、电流、功率、光通量、发光效率和寿命均随所加电压的变化成指数函数变化，并用特征指数描述其变化规律，如图 2 所示。

白炽灯寿命通常指新开始使用到断丝为止的时数，或指灯保持在规定的光通量数值上的燃点时间。图 2 示出了白炽灯的电源电压变化对灯寿命的影响，通常功率为 25W 以上的灯，燃点 750h 时光通量维持率可在 85% 以上，在数百毫秒至数秒的开灯与关灯周期内的瞬时电流，可使灯的寿命缩短 2%～8%。

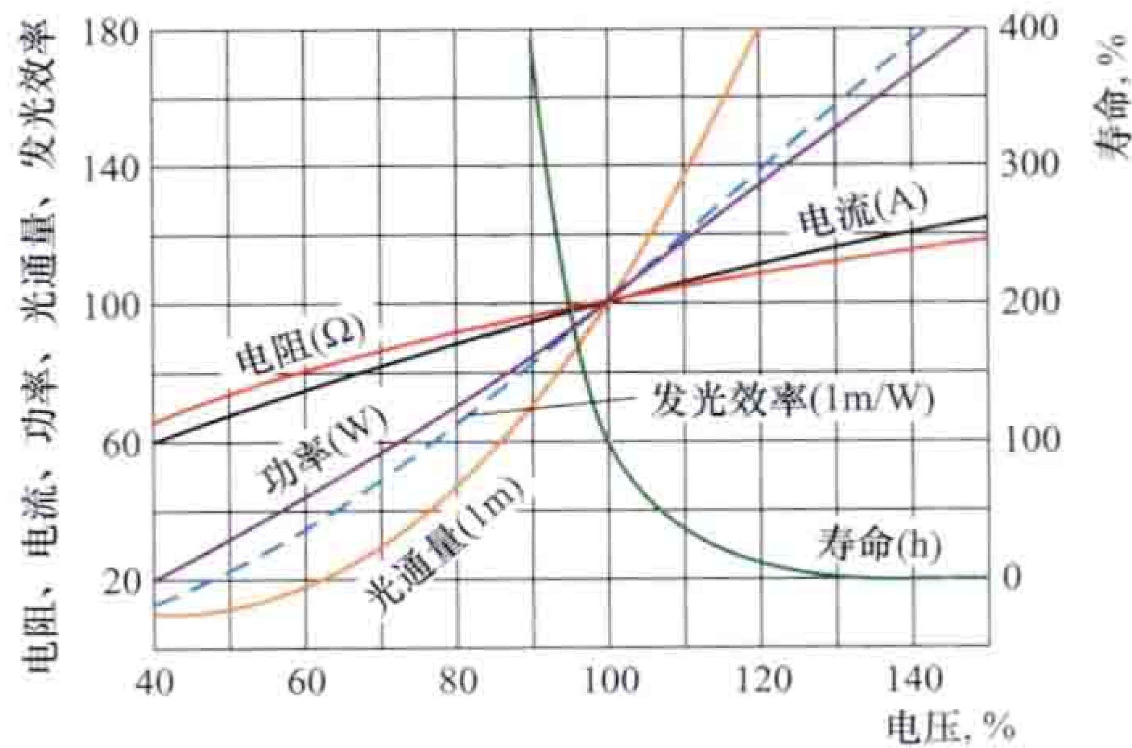


图 2　白炽灯的特性曲线

由于发光二极管灯、紧凑型荧光灯等高效光源在色温和显色性方面不断进步，已可在多种场合成功替代白炽灯。世界各国纷纷出台了淘汰白炽灯的路线图，中国规定至 2016 年不再销售和进口光源功率在 25W 以上的普通白炽灯。

baoan dianyuan

保安电源 (emergency power supply)　为避免停电造成某些重要设备失控而设置的向保安负荷供电的专用电源。其目的是当常用电源或主要电源故障断电时，防止发生人身伤亡和设备事故，造成重大经济损失和政治影响。保安电源必须是与其他电源无联系而能独立存在的电源；或与其他电源有较弱的联系，当其中一个电源故障断电时，不会导致另一个电源同时损坏的电源。保安电源与其他电源之间必须设置可靠的机械式或电气式联锁装置。

保安电源一般可由电力系统提供或由自备发电机组、静态交流不停电电源装置、工频晶闸管逆变电源装置等提供。

电力系统提供　可采取：①由电力系统的两个独立变电站向用户供电，其中一个作为保安电源。②由电力系统的两条独立的线路供电，其中一条作为保安电源。这两条线路是由两个电源供电，且有多台变压器并列运行的变电站中两段母线提供。③将保安负荷既连接到当地低压配电系统上，又连接到上一级电压的电网上。

自备发电机组　当设置自备发电机组比从电力系统取得保安电源更为经济合理时，可采用自备发电机组。柴（汽）油发电机组就是常用的一种，分单相、三相柴（汽）油发电机组，单机容量从几千瓦到数百千瓦。

静态交流不停电电源装置　简称 UPS，是一种高质量、高稳定性和高可靠性的静态型独立电源。UPS 与电力系统之间有直流储能环节隔离，排除了电力系统出现瞬时变化对 UPS 的干扰，保证了向保安负荷安全、可靠、连续、正常地供电。与柴（汽）油发电机组相比，UPS 体积小、效率高、占地少、安装方便、无旋转噪声、维护费用少。UPS 由晶闸管整流器、逆变器、交流静态开关和充电装置（蓄电池组）等组成（见图 1），主要用于计算机、通信设备等对供电连续性和供电质量有严格要求的场合。正常时，电力系统交流电经晶闸管整流器变为直流电，在对蓄电池组进行浮充电的同时，经逆变器输出优质的交流电对保安负荷供电。当电力系统故障突然停电时，它能自动切换到蓄电池组，利用蓄电池组的储能环节放电，经逆变器对保安负荷供电，达到不间断连续供电的目的。为保证

其供电时间，须根据保安负荷的大小合理配置电池容量。按接线方式的不同，UPS分为三大类：①单台UPS。它是基本的不停电电源供电系统。②并联UPS。具有一台或多台逆变器的UPS和其他UPS工作单元并联运行。③多重化UPS。由若干个分担负荷电流的UPS单元构成，分备用多重化UPS供电系统和并联多重化UPS系统。当运行中的UPS单元发生故障时，立即经交流静态开关切换到备用UPS单元向负荷供电，同时切断发生故障的UPS单元。多重化UPS按有无旁路分为有旁路和无旁路两种；按蓄电池组接线方式又分为蓄电池浮充式和蓄电池分离式（见图2）。

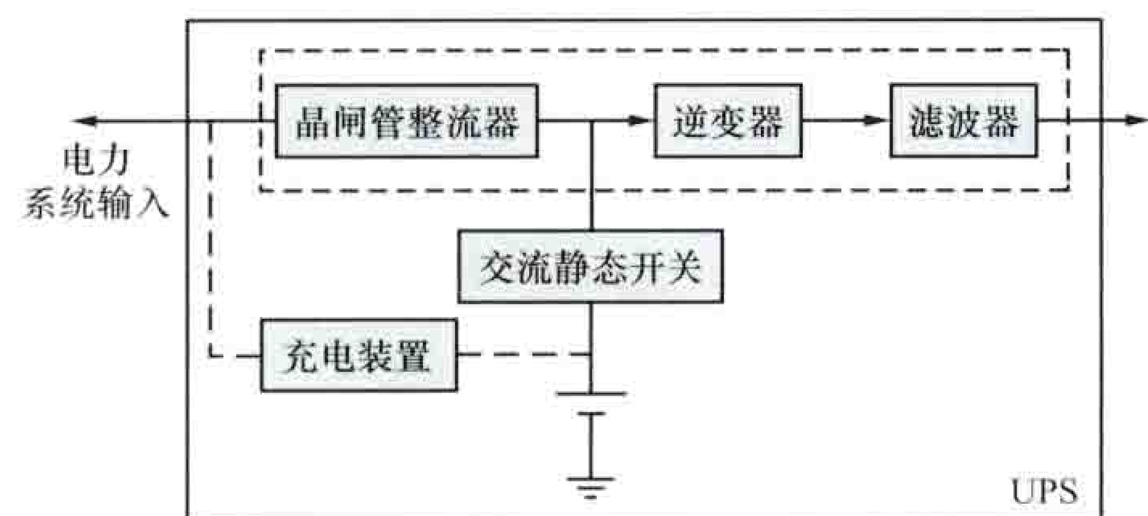


图1 静态交流不停电电源装置（UPS）原理框图

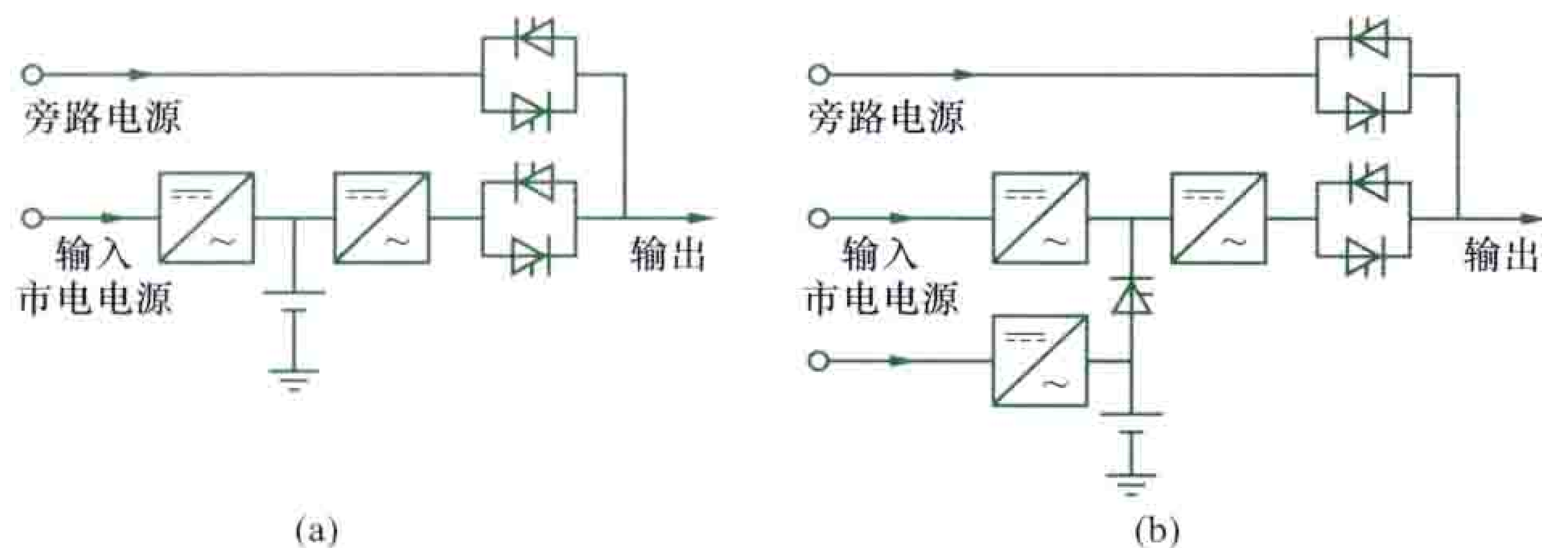


图2 UPS单元简图

（a）蓄电池浮充式；（b）蓄电池分离式

工频晶闸管逆变电源装置 在有直流电源的场所，当城市电网停电时，经低压断路器切换至该装置将直流电变换为交流电，供电给保安负荷。它具有体积小、质量轻、切换时间短、功率增益大的特点，用作自动化装置、通信和机场设施、控制室照明等对供电可靠性要求高的负荷的供电电源。

baoan fuhe

保安负荷 （protective load） 用于保障用电场所人身与财产安全所需的最小功率。电能是一种广泛使用的能源，不同的行业、不同的使用目的、不同的使用场所与对象，对供电可靠性要求的程度各有不同。有的对供电的可靠性要求极高，不允许出现供电中断的现象；有的即使供电有更长时间的中断，也不至于发生不安全事件。

保安负荷包括有毒、有害、易燃、易爆气体抽放或处理用电负荷，事故照明，安全及自动装置用电负荷以及保证人身和财产安全的其他有关用电负荷。根据中断供电引起后果严重程度的不同，有下列后果之一的场所，应有保安负荷：①中断供电将引发人身伤亡的；②中断供电将使有毒、有害气体溢出，造成环境大面积污染的；③生产空间存有易燃、易爆物质，中断供电将引起爆炸或火灾的；④中断供电将引起重大生产设备损坏的；⑤中断供电将引起社会治安混乱或在政治上产生严重影响的。（见中止供电）

供给保安负荷的电源统称为保安电源。保安电源的取得、保安电源的数量及容量的大小，主要取决于保安负荷对供电可靠性要求的程度及保安负荷的大小。保安电源可以由供电部门提供，也可由用户自备电源解决。

遇有当电力系统瓦解时仍需要保证供电的保安负荷，或由用户自备保安电源供电给保安负荷较之由供电企业供电更为经济合理时，用户应自备保安电源。用户自备保安电源包括用户自备发电厂（含汽油、柴油发电机组）、蓄电池组，向较小的保安负荷供电也可选用不停电电源（UPS）。对供电可靠性要求很高的保安负荷，可设多重保安电源，如大型计算机中心，除可由电网取得第二电源外，还需增设第三、第四电源。另外，对重要的保安负荷，也可以采用移动储能电源、移动应急电源或变电设备、分布式发电装置等对其供电。

保安电源必须是能相互独立存在的电源，即独立电源。

baohu jiedi

保护接地 （protective earthing） 将电气设备的某些部分用导线（接地线）与埋设在土壤中或水中的金属导体（接地体）相连接的做法，又称安全接地。当电气设备的绝缘发生损坏时，其金属外壳或构架可能带电，为了防止人体触及时引起触电，必须将电气设备的金属外壳或构架接地。（见低压配电网接地方式）

为保证接地的可靠性，电气设备的同一部分有时需要有一个以上的接地点，称为重复接地。低压架空线路的零线（接地的中性线）在其两端和分支处以及每隔1km处均需进行重复接地。

保护接地一般用于配电变压器中性点不直接接地（三相三线制）的供电系统中，保证电气设备因绝缘损坏而漏电时产生的对地电压不超过安全范围。

电力网和电气设备的下列金属部分，除另有规定者外，均应进行保护接地：①电机、变压器、电器和照明器具等的金属底座及外壳；②电气设备的金属传动装置；③互感器的二次绕组；④配电盘与控制台的框架；⑤屋内外配电装置的金属架构和钢筋混凝土架构以及靠近带电部分的金属围栏和金属门；⑥交、直流电力电缆接线盒、终端盒的外壳和电缆的金属外皮、穿线的钢管等；⑦装有避雷线的电力线路金属杆塔；⑧在非沥青地面的居民区内，无避雷线的小接地短路电流系统（见中压配电网中性点接地方式）的低压架空配电线路的金属杆塔和钢筋混凝土杆塔；⑨装在配电线路电杆上的开关设备、电容器等电气设备；⑩铠装控制电缆的外皮、非铠装或非金属护套电缆的1～2根屏蔽芯线。

在用电设备较少、安装分散、采用保护接零确有困难，而且土壤电阻率较低，很容易做接地时，可采用保护接地。但此时如用电设备漏电，设备外壳和与其有电气连接的金属部分、变压器外壳及其接地线都可能带电，会危及人身安全，应采取必要的安全措施，如装设能自动断开接地故障的继电保护装置、使用绝缘垫、安装保护围栏或采取在设备周围敷设闭合的均压带等。

携带式和移动式用电设备应当使用专用的芯线接地。此芯线严禁同时用来通过工作电流，严禁利用其他用电设备的零线接地。接地芯线应采用多股软铜线，其截面积不应小于$1.5mm^2$。携带式和移动式用电设备的插座上应备有专用的接地触头。该触头应同时与接地线和零线相连，而且所用插

头的结构应能避免将导电触头误作接地触头使用。插座与插头的接地触头应在导电的触头接触之前连通，并应在导电的触头脱离之后才断开。金属外壳的插座，其接地触头和金属外壳应有可靠的电气连接。

baohu jieling

保护接零 （protective connect to neutral） 在中性点直接接地的低压系统中，电气设备的金属外壳等与零线连接的做法，简称接零。将电气设备正常不带电的金属外壳，用导线与供电系统的零线（指零干线或专用保护接零线）进行可靠连接，以达到保护人身安全、防止触电事故发生的目的。（见低压配电网接地方式）

实施保护接零后，必须注意零线不能断线。在三相四线制中性点接地供电线路的零线（即中性线、零干线）上不允许装设开关和熔断器，否则当拉开开关或熔丝熔断时，相当于零线断路，从而使零线上可能出现危险电压，危及用电设备和人身安全。为防止零线断线，应实施零线重复接地，将变压器零线（三相四线制中的零干线）多点接地，接地电阻小于10Ω。

在同一配电变压器供电的低压系统内，严禁有的设备实施保护接零，有的设备实施保护接地。否则当保护接地的设备发生带电部分碰壳或漏电时，会使变压器零线（三相四线制系统中的零干线）电位升高，使所有采用保护接零的设备外壳带电，造成触电危险。装设剩余电流动作保护器的低压系统，零线不能再重复接地，电气设备只能实施保护接地，不能再实施保护接零，以防剩余电流动作保护器误动。

在中性点直接接地的低压配电系统中，电力设备的外壳宜采用保护接零。在城防、人防等潮湿场所，条件特别恶劣场所的低压配电系统中，电气设备的外壳应采用保护接零。脱粒机、切草机等因人常常与之接触，最好采用保护接零。

baojian qiju

保健器具 （health care appliances） 利用电加热及电子技术帮助人们缓解疲劳、辅助治疗某些疾病以及监测身体健康状态的一类小型家用电器的统称。家庭常用保健器具主要包括电动按摩器、足浴器、电子血压计、电子体温计等。

电动按摩器　利用电力使按摩头振动，对人体的一定部位施行按摩的保健器具。按结构原理电动按摩器可分为电动机式和电磁振动式。①电动机式按摩器。主要由电动机、弹簧轴、弹簧、偏心轮和按摩头组成。接通电源后，电动机通过弹簧轴带动偏心轮高速转动，偏心轮使按摩头产生振动。将按摩头放在身体适当部位，即可产生按摩效果。②电磁振动式按摩器。主要由电磁铁（包括线圈、固定铁芯和可动铁芯）、振动弹簧片和按摩头组成。固定铁芯上的线圈通交流电后，铁芯产生磁通，可动铁芯被固定铁芯吸引；线圈电流为零时，铁芯磁通消失，可动铁芯在弹簧力作用下恢复原位。交流电正负两半周，可动铁芯都被吸引，弹簧片不断地上下振动，与其固接的按摩头随之振动，产生按摩动作。这两种结构的按摩器，单独或与其他器材适当组合应用，即可构成各种便携式按摩器（按摩垫、按摩棒等）和固定式按摩器（按摩椅、按摩床等）。

足浴器　利用电能产生振动和热水，使之同时达到按摩和泡脚双重作用的保健器具，见图1。足浴器主要由加热元件、振动电动机、水泵等组成。通过振动电动机带动振动粒子和按摩头，通过气泡发生装置产生气泡、循环水流等对人体足底反射区的穴位进行冲击刺激，从而达到足疗保健的作用。按控制方式可分为机械式和电脑式两种。



图1　足浴器

电子血压计　利用压力传感器和微电子器件测量人体血压的保健器具，见图2。电子血压计根据测量部位不同有臂式、腕式和指式之分。根据是否需要手动加压分为半自动式和全自动式。①半自动电子血压计，由气袋、数字血压计和打气球组成，气带缠于上臂后，用打气球手动加压，血压值自动显示在显示器上。②全自动电子血压计，将压力传感器、微处理器、显示器和气袋装为一体，打开开关会自动充气加压，压力信号由传感器变为电信号，经微处理器处理后，在显示器上显示血压值。



图2　电子血压计

电子体温计　利用温度传感器和微电子器件测量人体体温的保健器具，见图3。它主要由温度传感器、微处理器和显示器组成。温度传感器检测人体温度后转换成电信号，经微处理器处理后，在显示器上显示体温值。根据测量部位不同，电子体温计又可分为腋式、耳/额式。①腋式电子体温计，传感器是热敏电阻或热敏半导体，和传统体温计一样夹在腋下使用；②耳/额式电子体温计，传感器是红外线传感器，使用时将体温计前端插入耳中或者对准额头即可测定。



图3　电子体温计

beiyong dianyuan

备用电源 （standby power supply） 当正常供电电源因故障而失去供电功能时承担全部或部分供电任务的电源，又称第二电源。根据承担供电任务的不同，备用电源分为生产备用电源和保安备用电源。

生产备用电源是在正常供电电源失去供电功能时，为避免因断电造成重大经济损失，保证持续生产所需的供电而设置的。生产备用电源的容量应与正常供电电源的容量相等。生产备用电源一般与正常供电电源并列运行，也可在备用状态下运行，一旦正常供电电源故障，依靠自动装置在切除故障电源的同时自动投入运行。

保安备用电源是在正常供电电源失去供电功能时，为保证对保安负荷的不间断供电而设置的。保安备用电源的容量一般比正常供电电源的容量小，只要能满足保安负荷的需求即可。保安备用电源必须是独立电源，且与正常供电电源同时运行。

在电力系统瓦解时，仍要求保证供电的用户，以及自备保安电源比从电力系统取得第二电源经济合理的用户，宜自行设置备用电源。

benglei jiedian jishu

泵类节电技术 (electricity saving technology of pumps)

提高泵类运行效率，降低电能消耗的措施与方法。泵广泛应用于工矿企业中，是一种主要的用电设备。在中国，泵的用电量占全国用电量的20.9%。国家规定泵的效率不得低于60%，但在实际应用中，由于选型及管道设计不合理、流量调节方法不当、管理不善等原因，导致泵的运行效率普遍低于国家规定，严重浪费了电能。如果采取合理的改造措施，一般可以节电20%～30%。

泵是一种输送流体的水力机械，用途广，种类多，一般分为离心泵、混流泵和轴流泵。①离心泵利用叶轮旋转产生离心力，给水一定的压力和动能；②混流泵利用叶轮旋转产生离心力和轴向推力，叶轮内的水流在此作用下对轴倾斜成一角度而流出，因此又称为斜流泵；③轴流泵靠叶轮的推力，给水一定的压力和动能，使水沿轴的方向流动，因而得名。

泵的节电措施和方法有改造低效泵、降低管路阻力、选用合理的调节方式、合理选型等。

改造低效泵　泵运行效率的高低，是衡量节电优劣的标志。造成泵运行效率低的原因有：①设计制造工艺水平落后，使泵本身的额定效率低；②泵的设计选型不当或匹配不合理，使泵运行工作点偏离高效区；③维护不当，磨损严重。在对泵改造前须进行电能平衡测试，以便分析泵运行效率低的原因，确定改造的对策。改造低效泵的措施有更新或换叶轮、多级泵减级运行、车削叶轮直径、打磨叶轮流道、提高检修和装配质量。

（1）更新或换叶轮。用高效泵替换低效泵，或者用高效泵的叶轮代替低效泵的叶轮，这种方法一般用于解决因制造工艺、结构等原因造成的泵运行效率低下问题。用换叶轮的办法改造低效泵，泵壳和电动机不改动，工作量小，较为经济，节电效果亦显著。

（2）多级泵减级运行。拆去一级或二级叶轮，改变泵的特性曲线。这种方法一般用于解决因设计选型不当造成的泵额定扬程过大问题，通过适当降低泵的扬程和流量，达到减少电能消耗的目的。

（3）车削叶轮直径。单级泵扬程过高的，可采用适度切削叶轮直径的方法，改善泵的特性曲线，降低电能消耗。切削量与泵的比转数有关，比转数越高则切削量越小。轴流泵不宜采用切削叶轮的方法改造。

（4）打磨叶轮流道。用以提高流道光洁程度，减少水头损失。

（5）提高检修和装配质量。定期进行运行维护，保持密封良好，减少泄漏损失。

降低管路阻力　降低泵运行时因流体经过管路与闸门造成的能量损失的一种措施。降低管路阻力的方法有：①去掉离心式水泵底阀，用真空泵或射流抽真空的办法注水。②用微阻缓闭止回阀替代旧式止逆阀，在降低管路阻力的同时还可消除水锤现象。③改善弯道配置，尽量缩短泵的吸入和输送管道长度，加大管道内径，减少不必要的弯道、阀门，定期清洗管路，除掉水垢和杂物。

选用合理的调节方式　泵类输送的流体是根据需要而变动的，选择合理的调节方式可以达到节能效果。调节方法包括：①调节管路上阀门的开度，改变泵的工作点。这种方法是用增加管路的阻力来实现的，增加阻力将增加能耗，因此不可取。②改变泵的工作台数进行流量的粗调节，再采用调速方法（见电动机节电技术）进行流量的细调节。这种方法是通过改变泵的特性曲线来实现的，有较好的节能效果。泵类调速的方法有很多，按效率高低排序为：改变电动机绕组级对数、变频调速、交流串级调速、转子串电阻调速、采用液压连联器调速、采用液力耦合器调速等。

合理选型　正确合理地选用泵，是保证安全经济运行的前提，也是实现节电的基础。泵的选型包括确定泵的型号、台数、规格、转速以及配套的电动机及相应的调节方式。

选型原则：选型时，需掌握输送流体的物理特性，输送的最大流量、最小流量和扬程，管网的布置及几何尺寸，以及流量、扬程控制点的参数等。需考虑：①所选用的泵能满足最大扬程和最大流量的需要；②选用结构合理的高效型泵，在条件允许的情况下，尽量选用高转速泵；③选择节能型调节方式，使泵的运行工况点能保持在高效区内；④有效率较高的管网系统与其相配合。

选型步骤：①计算设计的流量与扬程；②选定泵的转速，计算出比转数；③根据比转数，确定所选泵的类型、台数和级数；④根据所选类型，在该类型泵的综合性能图上选取最合适的型号，确定转速、功率和工作范围；⑤从泵的样本上查出所选台泵的性能曲线，有多台泵同时工作的，要绘出不同运行方式下泵的性能曲线；⑥根据管路性能曲线和不同运行方式下的泵的性能曲线，校核泵的工况点，如果泵的工况点不在高效区域内，则应重复上述步骤再选，直至运行工况点落在高效区域内为止。

biangeng yongdian

变更用电 (additions or alterations to existing electrical installations)

改变由供用电双方签订的供用电合同中约定的有关用电事宜的行为。变更用电是因用户在经营、生产、建设、生活等方面的用电需求发生变化而要求改变用电行为的总称。用户要求变更用电，需携带有关证明到供电企业用电营业场所办理手续，并变更供用电合同的约定。中国的《供电营业规则》中规定的变更用电有减容、暂停、暂换、迁址、移表、暂拆、过户、分户、并户、销户、改变供电电压等级和改变用电类别等12项内容。

减容　减少供用电合同约定的用电容量。减容须提前5天向供电企业提出申请。减容必须是整台或整组变压器停止运行或更换小容量变压器用电。用户申请减容的目的是要减少基本电费的支出。减容时间的长短，根据提出的申请确定，但最短期限不得少于6个月，最长期限不得超过2年。减容期间，供电企业应保留其所减容量的占有权。

暂停　暂时停止全部或部分受电设备的用电。因设备检修、生产临时性调整或季节性生产的用户，为减少上述时期内的基本电费支出，可以提出暂停用电的申请。暂停用电也必须是整台或整组变压器停止运行。在每一日历年内，用户可申请全部或部分用电容量的暂时停止用电2次，每次不能少于15天，一年累计暂停时间不能超过6个月。

暂换　临时更换大容量变压器。因受电变压器故障而无相同容量变压器替代，需要临时更换大容量变压器时，用户

可申请办理暂换手续。暂换必须在原受电点内整台的替换受电变压器，替换变压器的使用时间一般也有限制，10kV及以下的不能超过2个月，35kV及以上的不能超过3个月。

迁址　迁移受电装置的用电地址。迁址有可能引起供电点的改变而影响供电企业供电设施的适应能力。因此，用户迁址须提前5天提出申请，办理手续。私自迁址是《供电营业规则》中规定的应及时予以制止的违约行为。

移表　移动电能计量装置安装位置。因修缮房屋或其他原因需要移动电能计量装置的安装位置时，用户应提出申请并办理有关手续后，由供电企业组织实施，用户不能自行移动，以保护电能计量装置准确、可靠的计量。

暂拆　暂时停止用电并拆除电能计量装置。因修缮房屋等原因需要暂时停止用电并拆除电能计量装置时，用户可提出申请办理有关手续。暂拆的时间最长不能超过6个月。在此期间，供电企业保留该用户原容量的使用权，但超过暂拆规定的时间要求复装接电者，须按新装办理手续。

过户　改变用户的名称，又称更名。依法变更用户名称或居民用户房屋变更户主时，出现的变更用电事宜。在原用户的供用电条件不变的情况下，可以办理此项手续。过户时原用户与供电企业的债务应结清。私自过户一经发现，除补办手续外，新用户还应承担原用户的债务。

分户　一个用户分列为两个及以上的用户。用户依法分立或居民合户用表改为分户供电时，办理此项变更用电手续。分立后的新用户应与供电企业重新建立供用电关系。

并户　两户及以上用户合并为一个用户。在同一供电点，同一用电地址的相邻两个及以上用户可以办理这项变更用电手续。原用户在并户前应向供电企业结清债务，新用户用电容量不能超过合并前各户容量之总和。

销户　终止用电并解除供用电关系。用户不再继续用电或连续半年以上不用电，也不申请办理暂停用电手续，或用户依法破产时，供电企业将终止对其供电并予以销户，解除供用电关系，但用电期间债务并不免除。销户后的用户需再用电时，须按新装手续办理。

改变供电电压等级　因用户原因需要改变供电电压等级、增加供电回路或增加保安备用电源（包括自备电源）时需变更用电的事宜。这类事项只能在原址上变更，办理相应的手续后才可用电。

改变用电类别　在同一用户受（送）电装置内，用户的电力用途发生变化而引起用电电价类别改变时，需变更用电的事宜。如原约定为居民生活用电，后改为商业用电，或者相反；原约定为农业排灌用电，后改为普通工业用电，或者相反等等。此时，用户应向供电企业提出变更用电申请，以免发生违章用电现象或增加（或减少）电费的支出。

bianliu zhuangzhi jiedian jishu

变流装置节电技术　(electricity saving technology of transducer set)　降低变流装置电能消耗的措施与方法。变流装置泛指整流器、逆变器、变频器，是一种使用范围很广的电气设备。整流器可用于充电、电镀、电化学加工、弧焊电源、电力牵引、电解和电力拖动的调压、调速；逆变器用于直流变交流的场合，如直流输电、交流-直流-交流调速装置；变频器可用于频率变换，如中频电源。

变流装置的换流元件经历了机械、电子管、半导体元件的发展过程；半导体元件又经历了从硅元件到晶闸管元件，小功率元件到大功率元件的发展过程。随着换流元件的发展，变流装置电能损耗已大为减少。晶闸管元件的应用和有载调压装置的采用，变流装置有可能取代感应式调压器，而将调压器与变压器合二为一，这样又可大量减少变流装置的电能损耗。因此，早期使用的电动直流发电机组、汞弧整流器、带感应式调压器的变流器，已全部被硅变流装置或晶闸管变流装置所取代。

变流装置的损耗　硅变流装置和晶闸管变流装置的损耗有：①硅整流元件损耗，主要由半导体PN结正、反向电阻，焊接电阻，导体电阻引起。②整流变压器（包括平衡电抗器）损耗，即变压器的铜损和铁损。③电抗器（饱和电抗器、滤波电抗器）损耗，即电抗器的铜损、铁损。④均压电阻损耗。⑤交流和直流侧RC过电压保护装置损耗，即电阻损耗与电容介质损耗。⑥换相过压保护装置损耗，即电阻与电容上的损耗。⑦连接母线电阻损耗。⑧熔断器损耗。⑨辅助设备上的损耗，包括人工负载电阻、冷却系统、触发电路、双变流器连接的环流等引起的损耗。

变流装置节电措施　硅变流装置是一种效率较高的电气设备，但仍有节电潜力，减少其损耗的主要措施有：①尽可能选用自冷式硅变流装置，这样可以减少冷却系统的耗电量。②采用风冷式硅变流装置，风机的投切可根据负荷及室温进行自动控制。风机投切的温度可以通过试验确定。③采用漏电电流很小的氧化锌避雷器替代交流侧RC过电压保护装置。④加装按负荷变化的自动投切装置，在直流侧装有防止小负荷电压突升的稳压电阻，降低电能损耗。⑤对于牵引用的整流器，可以在整流站内装设逆变器，在牵引制动时，将制动的能量回收反馈输入电网，抵补部分电能消耗。⑥按损耗最小的原则将多台整流器并列运行，这样可减少整流器损耗，节约电能，使变流装置达到经济运行。

bianpinqi

变频器　(inverter)　将一种频率的电源变换为另一种频率电源的装置。变频器（见图1）是电力电子变换器的一种，其通过电力半导体器件的开通和关断既可以改变交流电源的频率，也可以改变交流电源的电压和电流值。变频器一般用于交流电动机调速系统，通过改变施加在交流电动机上的电压幅值和频率来改变交流电动机的转速，从而满足工艺要求或实现节能目的。也可用于风力发电等领域，把频率和电压不固定的交流电源变为频率、相位、幅值都与电网电压相同的交流电源，实现电源的并网。



图1　变频器

早期的变频器一般采用方波控制，存在谐波含量大等缺点。随着高频全控型电力电子开关器件的出现，采用脉宽调制方式控制的变频器（见交流脉宽调制变频调速）已占据主导地位。

变频器按照是否有中间直流环节，可以分为交流-交流变频器和交流-直流-交流变频器；按照输出的交流电压的电平数，可以分为两电平变频器和多电平变频器；按照变频器的工作电压，可以分为低压变频器和中高压变频器。

交流-交流变频器　直接把交流电源变为另外一种频率和电压的交流电源的变频器，不需要经过中间直流环节。传统三相交流-交流变频器由三组反并联晶闸管可逆桥式变流器组成，采用电网自然换流，只需一次换流就可以实现变频，换流效率高，可以方便地实现四象限运行，在低频时输出波形接近正弦波。但是这种交流-交流变频器使用了较多的晶闸管，线路复杂；输出频率范围较窄，只能为电网频率的 1/3～1/2，并且功率因数较低。矩阵变换器（见矩阵变换器变频调速）是一种采用双向开关的交流-交流变频器，采用脉宽调制（PWM）技术来使输出的交流电压符合期望值。（见交流-交流直接变频调速）

交流-直流-交流变频器　把交流电源先经过整流器变为直流，然后再经过逆变器变为交流电源的变频器。一般由整流器、直流环节、逆变器组成。

整流器一般采用二极管组成的不控整流器，如图 2（a）所示；或者采用晶闸管或绝缘栅型双极性晶体管等可控电力电子器件组成可控整流器，如图 2（b）所示。不控整流器成本低，不需要进行控制，能量只能单向传输，输入侧的谐波较大。可控整流器需要对整流器中的电力电子器件进行控制，能量可以双向传输，输入侧的功率因数可以控制为 1。

图 2　交流-直流-交流变频器的结构
（a）采用不控整流器的变频器；
（b）采用可控整流器的变频器

交流-直流-交流变频器按照中间直流环节为电压源或者电流源，可以分为电压型变频器和电流型变频器。电压型变频器的直流侧并有大电容滤波，可将直流侧等效为一个电压源。如图 2 所示的变频器均为电压型变频器。电流型变频器的直流侧用大电感滤波，可将直流侧等效为一个电流源。（见交流-直流-交流电压型变频调速、交流-直流-交流电流型变频调速）

两电平变频器　逆变器的输出只有两个电平的变频器。如图 3 所示，若以直流母线电压的中点定义为参考点，逆变器的某一相桥臂中，上面的器件导通而下面的器件关断时，该相输出电压为 $+\frac{1}{2}U_{DC}$，当上面的器件关断而下面的器件导通时，该相输出电压为 $-\frac{1}{2}U_{DC}$。所以每一相的输出电压只有 $\pm\frac{1}{2}U_{DC}$ 两种电平。

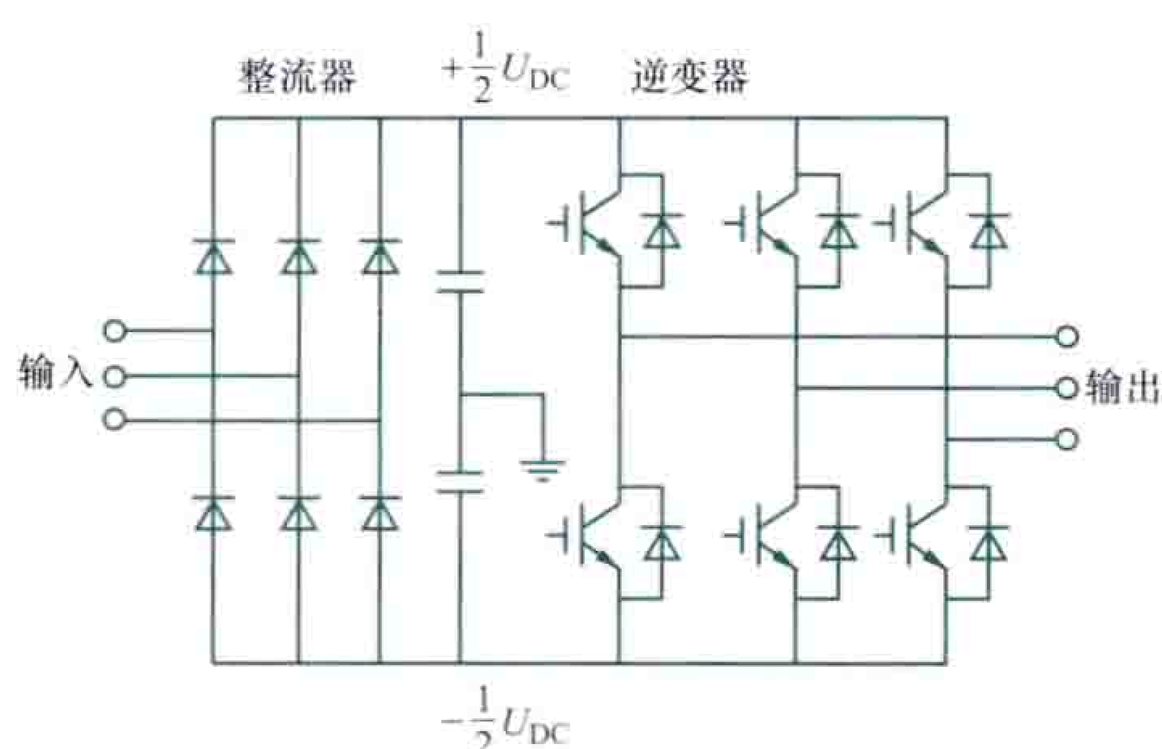


图 3　两电平变频器结构图

图 3 所示的变频器中，逆变器中每个 IGBT 器件所承受的正向电压为 U_{DC}，由于电力电子器件的耐压水平受到限制，U_{DC} 电压值不能太高，因此这种逆变器的输出电压不能太高，一般用于低压场合。两电平变频器一般应用于线电压为 380V 的交流电动机调速中，所以也称作低压变频器。随着电力电子器件耐压水平的提高，特别是耐压值为 4500V 和 6500V 的器件的出现，两电平变频器也可以应用于一些中压场合。

多电平变频器　在两电平变频器中，由于电力电子器件的耐压值有限，为了输出更高的电压，可以采用器件串联的方式。由于电力电子器件的特性存在一定的差异，如果不能保证所有的器件同时开通和关断，则某些晚开通或者早关断的器件很容易受到过电压而损坏。为了避免器件直接串联所带来的问题，常采用多电平变频器。多电平变频器一般也被称作中高压变频器。常用的多电平变频器有二极管钳位型和 H 桥级联型两种结构。

二极管钳位型多电平变频器中应用最普遍的是二极管钳位型三电平变频器。二极管钳位型三电平变频器的逆变器部分结构如图 4 所示，直流母线上的电容 C1 和 C2 的电压均为直流母线电压的一半，即 $E/2$。运行过程中，始终保证每相桥臂的 1、3 管互锁，2、4 管互锁，因此每相桥臂的输出有 3 种电平。以 A 相桥臂为例，当 Va1 和 Va2 导通时，输出接直流母线的正端 P；当 Va3 和 Va4 导通时，输出接直流母线的负端 N；当 Va2 和 Va3 导通时，输出接直流母线的中点 m。三电平变频器已经普遍应用于交流线电压为 1140V 等级的交流电动机调速中，在潜油泵、轧钢系统中得到广泛应用。如果在整流器中也采用图 4 所示的结构，则可以构成四象限运行的三电平逆变器，适合于需要能量回馈的场合。

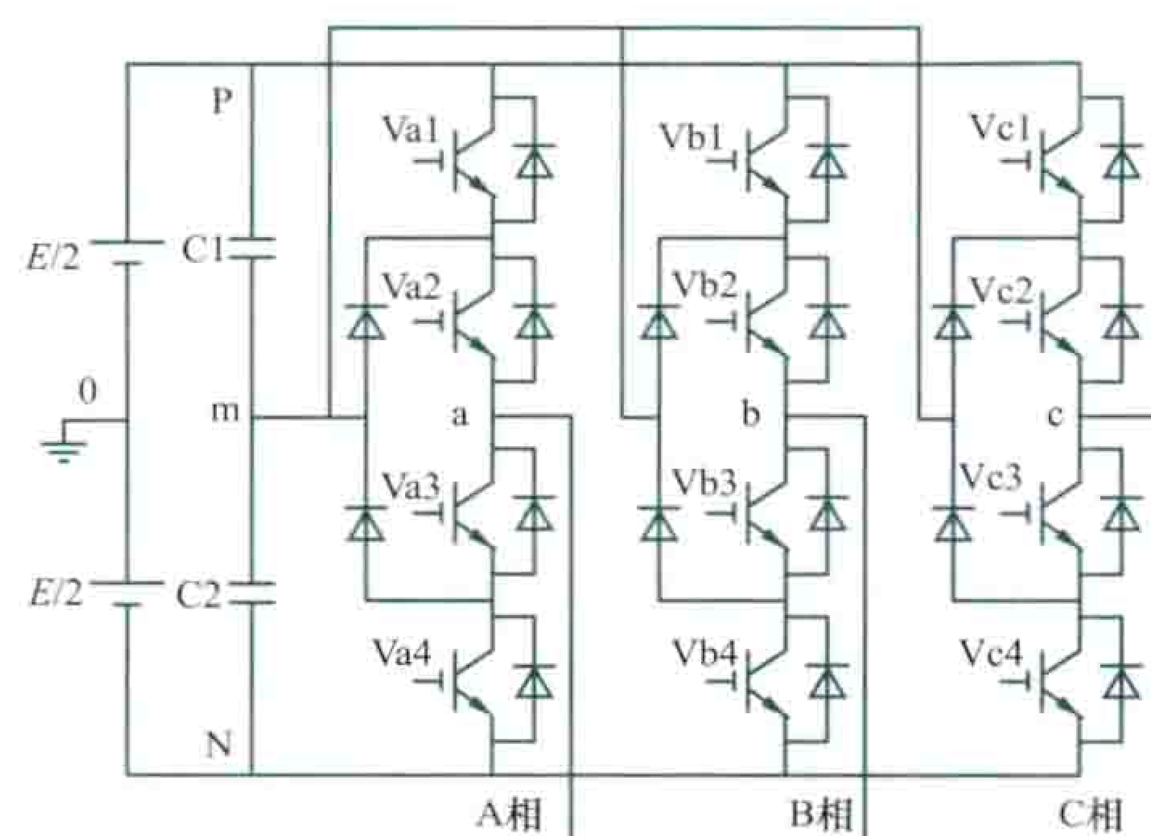


图 4　二极管钳位型三电平变频器的逆变器部分结构图

H 桥级联型变频器如图 5 所示，由隔

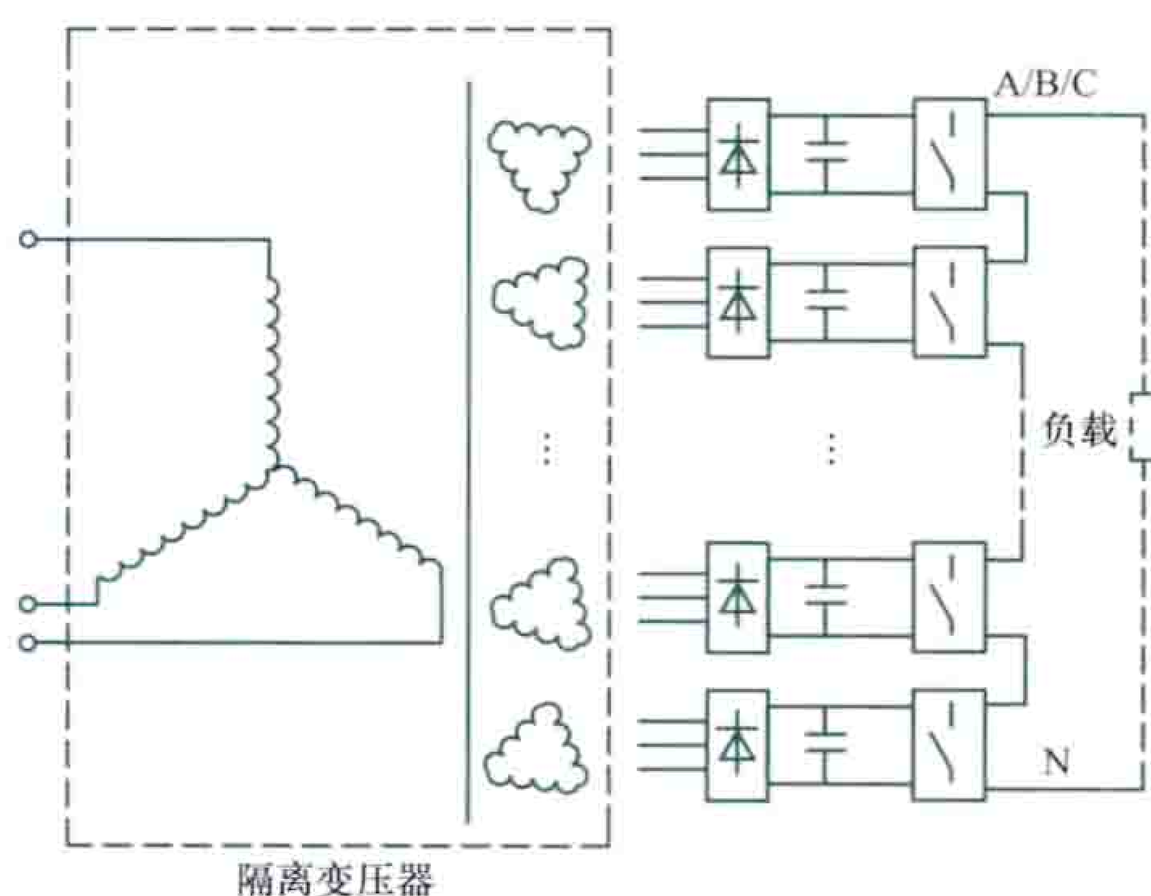


图 5　H 桥串联单相输出结构图

离变压器和级联单元组成。隔离变压器一次侧为交流输入，二次侧为相互隔离的多个绕组，并对各级联单元进行供电。为了保证输入侧的谐波抑制性能，隔离变压器的二次侧绕组一般相互移相一定的角度。级联单元由整流器、直流母线电容和H桥逆变器组成，如图6所示。H桥级联型变频器各单元一般采用移相PWM控制，同时在级联单元上设置旁路开关，在单元故障时可以切除该单元，整个变频器可以降额继续运行。H桥级联型变频器可以根据输出电压的需要来配置级联单元数，因此可以应用于中压和高压场合。如果把级联单元的整流器改为可控整流器，H桥级联型变频器也可以实现四象限运行，但是控制比较复杂。

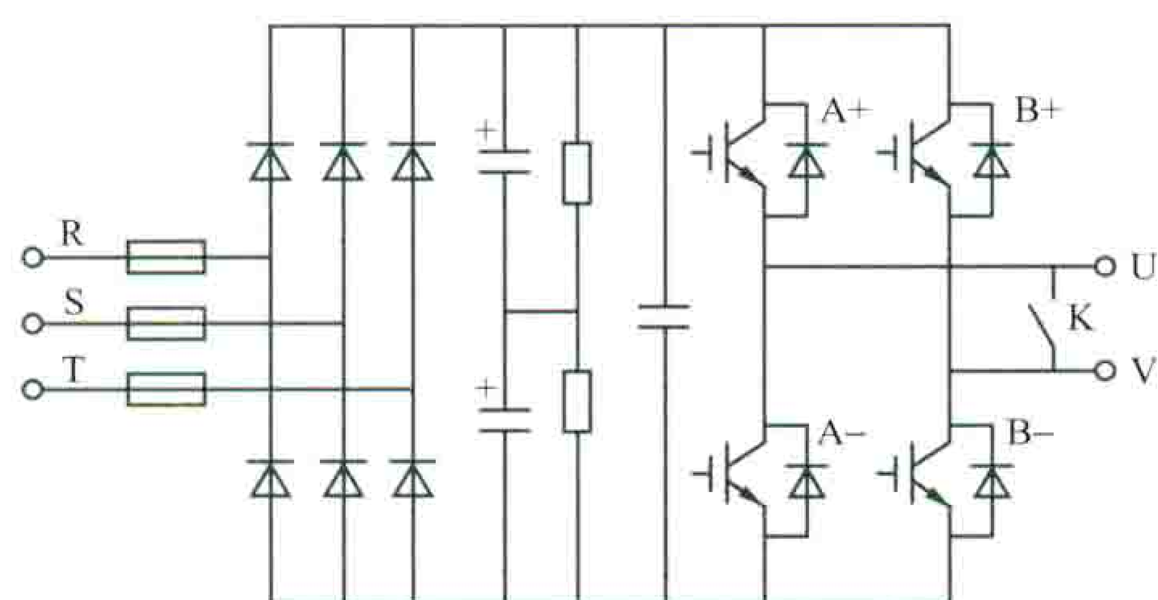


图6　H桥级联单元结构图

bianpin tiaosu

变频调速　(variable frequency AC motor speed control)

改变交流电动机定子供电电源频率实现调速的技术。交流电动机的极对数一定时，其同步转速与供电电源频率成正比，改变频率就能调节转速。变频调速是比较合理和理想的一种调速方式，具有高效率、高精度和可平滑调速的优点，能实现恒转矩或恒功率调速，以扩大调速范围。采用变频调速技术，可以使交流传动系统实现节能运行，因此得到了广泛的应用，特别是在笼型感应电动机驱动的风机和水泵系统中，见图1。变频调速系统包括变频电源装置（变频器）、控制系统及电动机负载。其关键技术是变频器的构成、控制系统的控制方式及电动机的运行方式。

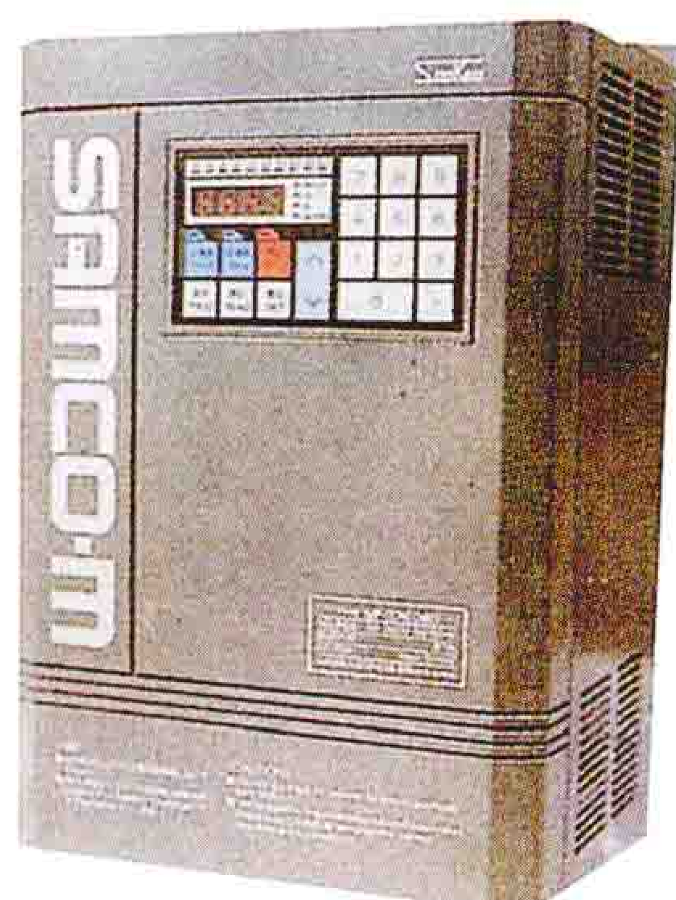


图1　交流电机变频调速系统（用于控制恒压变量供水系统）

变频器　可分为交流-交流直接变频器和交流-直流-交流变频器两大类。前者直接将恒频的交流电通过电力变流器变为变频交流电源，即一次换能；后者须先变换为直流电后再变换为变频交流电源，即两次换能。交流-交流直接变频器可分为采用晶闸管换流的交流-交流变频器和采用全控开关器件的矩阵变换器。交流-直流-交流变频器可分为采用晶闸管换流的交流-直流-交流变频器和采用全控开关器件的交流-直流-交流脉宽调制型变频器。若考虑交流-直流-交流变频器中间直流环节的性质（电压源或电流源），则可分为交流-直流-交流电压型变频器和交流-直流-交流电流型变频器。（见变频器）

控制方法　控制系统对变频器进行控制的方法主要有变压变频（VVVF）控制、转差频率速度闭环控制、矢量控制以及直接转矩控制。变压变频控制是一种开环控制方式，适用于对转速控制精度要求不高的调速系统。转差频率速度闭环控制实现了对转速的闭环调节，可以得到与双闭环晶闸管直流调速系统（见直流电动机调速）相近的静态和动态特性，适用于转速控制性能要求较高的场合。矢量控制调速系统能使交流电动机获得近似直流电动机的良好动态调速特性，得到软控制特性，是一种高性能的交流电动机调速技术，适用于大、中、小容量交流电动机电力拖动系统。直接转矩控制把转矩直接作为被控量，利用空间矢量的分析方法，以定子磁场定向的方式，对定子磁链和电磁转矩进行直接控制，可实现转矩的迅速响应，是一种高动、静态性能的调速方法。

运行方式　电动机在变频电源下的运行方式有恒磁通运行和恒功率运行两种。变频器的控制必须适应这两种运行方式。

恒磁通运行是在调速过程中保持电动机的气隙磁通不变，以保持电动机具有合理的气隙磁通。由于定子绕组感应电动势与电源频率及气隙磁通的乘积成正比，在绕组电动势一定的情况下，气隙磁通将与频率成反比。为了保持气隙磁通不变，必须保持电动势与频率的比值也不变，即调节频率的同时成比例地调节电动势，这是理想的保持磁通不变的控制条件。如果采用电压与频率的比值不变的控制原则，也可近似实现保持磁通不变，但在低频时定子电阻压降的影响较大，致使最大转矩下降。所以恒电压频率比控制原则只适合于调速范围不太大、最低转速不太低的负载，或者负载转矩随转速的降低而减小的负载，如与转速二次方成正比的风机、泵类负载。图2所示为恒电压频率比运行时感应电动机的转矩-转速特性，曲线1～5分别表示感应电动机在供电频率为f_1～f_5时的转矩-转速特性，虚线表示其适宜的负载转矩特性。如果在控制回路中加入函数发生器控制环节，能补偿低频时定子电阻的电压降，使电动势频率比近似等于常数，当进行恒转矩调速时，可保持电动机的过载能力不变。图3所示为经过补偿定子电阻压降后的感应电动机的转矩-转速特性及恒负载转矩特性。

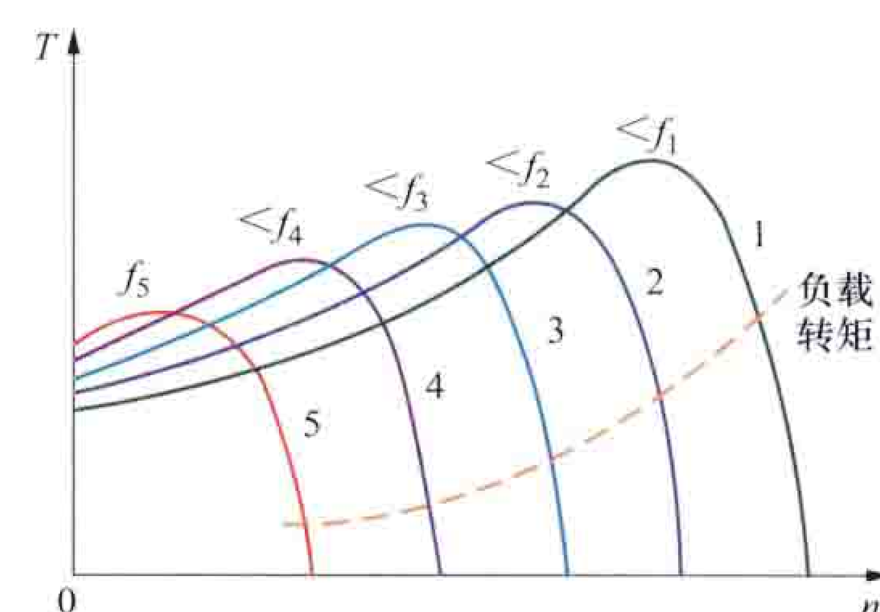


图2　恒电压频率比运行时感应电动机的转矩-转速特性

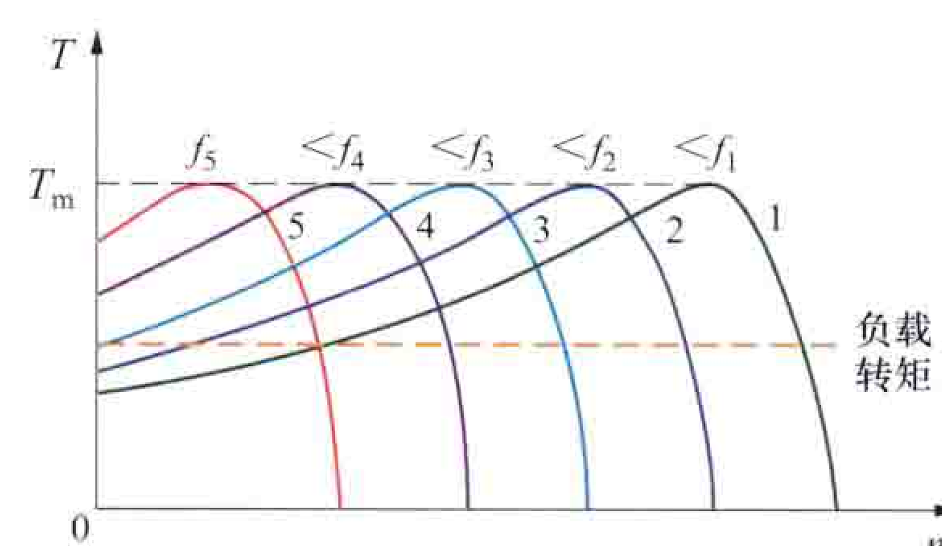


图3　补偿后感应电动机的转矩-转速特性

恒功率运行是电动机在低速运行时要求输出转矩大，在高速运行时要求输出转矩小，转矩与频率呈反比关系的运行方式。恒功率变频调速过程中，仍要求保持不变的过载能力。如负载本身是恒功率性质，电动机电压应随频率的二次方根成比例变化，此时气隙磁通与频率二次方根成反比，因而气隙磁通应以最低频率时为准。如负载是转矩与转速二次方成比例的风机、泵类，电动机电压应随频率的二次方成比

例变化，此时气隙磁通与频率成正比，因而气隙磁通应以最高频率时为准。恒功率变频调速主要用于牵引电机中。此外，当恒转矩变频调速的频率至额定频率（电动机铭牌规定值）以后，由于调速装置的耐压和电动机容量的限制，电动机电压将维持不变，可以实现近似恒功率调速。图4所示为恒功率运行时感应电动机的转矩-转速特性。

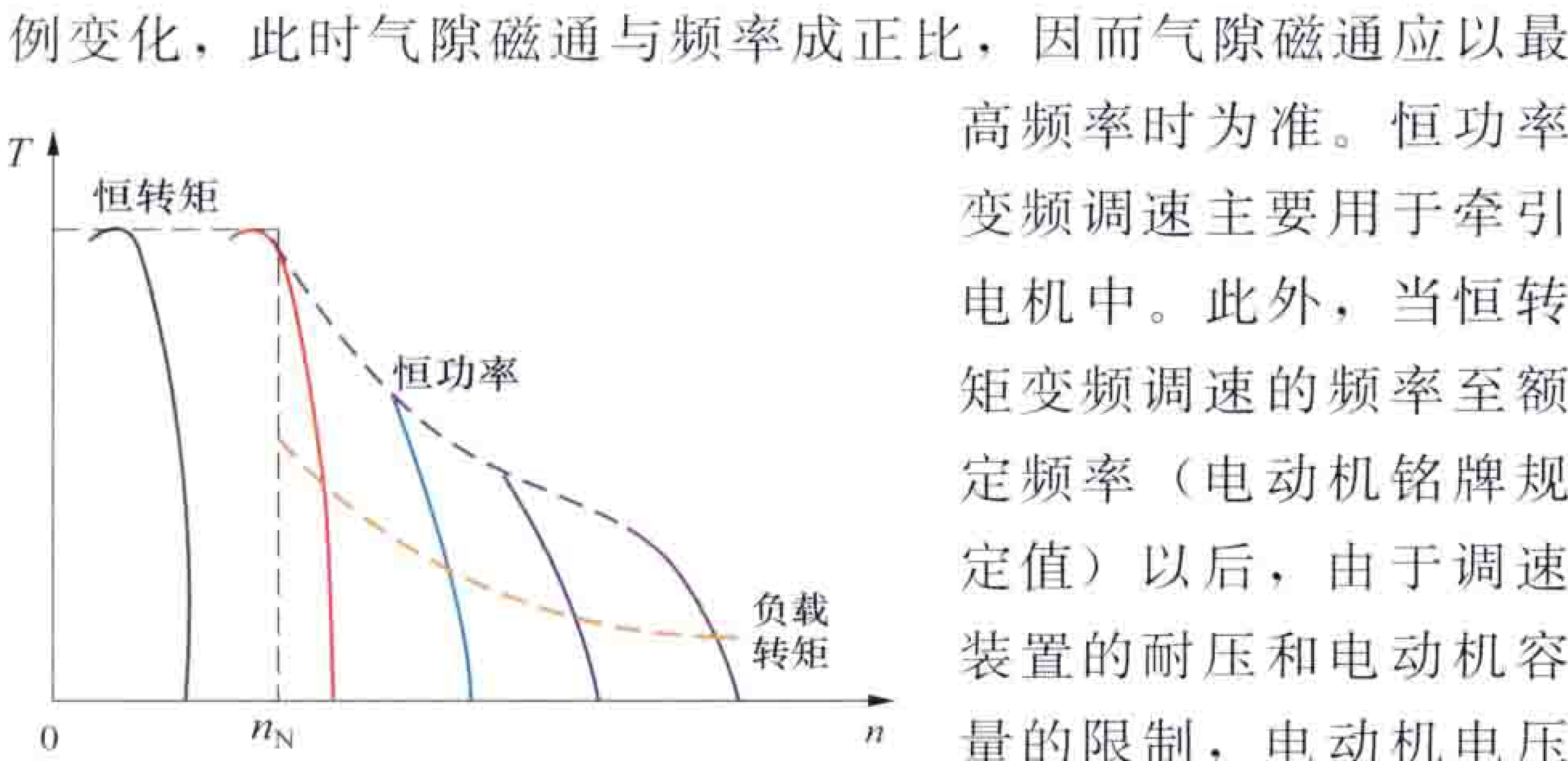


图4　恒功率运行时感应电动机的转矩-转速特性

参考书目

黄立培．电动机控制．北京：清华大学出版社，2003.

阮毅，陈伯时．电力拖动自动控制系统——运动控制系统．北京：机械工业出版社，2010.

bianyaqi jiedian jishu

变压器节电技术　（electricity saving technology of transformers）　降低电力变压器电能损耗的措施与方法。电力变压器是电力系统中实现电能转换与分配的电气设备，它在进行电能转换的过程中必定产生电能损耗。尽管变压器效率已高达95%～99%，由于在电力系统中其拥有量巨大，且因空载耗电的固定性，即便变压器效率有小的改善，也可以获得相当大的节能效果。

变压器损耗是变压器质量指标之一，主要包括来自铁芯的空载损耗和绕组的负载损耗。

空载损耗又称铁损。它是由励磁电流在变压器铁芯中产生的交变磁通引起的。空载损耗分为涡流损耗和磁滞损耗。涡流损耗是交变磁通在铁芯中产生的感应电流引起的热损失，其大小与铁芯材料的电阻率和铁芯厚度有关。磁滞损耗是在交变磁场作用下使铁芯的磁畴周期性旋转引起的铁芯发热损耗，其大小与铁芯的材料、结构、加工工艺及加工质量等因素有关。

负载损耗又称铜损或短路损耗。它包括电流在绕组直流电阻上产生的损耗、绕组的涡流损耗以及漏磁场在绕组和金属部件中产生的杂散损耗。负载损耗除与绕组所用的导电材料有关外，还与绕组导线的截面积、绝缘结构、绕组绕制方式、金属部件材质性能、漏磁通的屏蔽方法等因素有关。

变压器的主要节电技术包括选用节能变压器和变压器经济运行。

选用节能变压器　采用新材料、新结构、新工艺制造的节能变压器，其损耗比一般低效变压器小，因此又称低损耗变压器。生产低损耗变压器是世界各国变压器发展的一种趋势。这不仅是世界性能源紧张、节能的需要，也是技术进步、产品更新换代的必然结果。中国生产的S11、S13系列变压器相对于S9系列来说，属于节能变压器。S9、S11、S13系列变压器损耗参数对照见表。

S9、S11、S13系列变压器损耗参数对照

额定容量(kV·A)	S9		S11		S13	
	空载损耗(W)	负载损耗(W)	空载损耗(W)	负载损耗(W)	空载损耗(W)	负载损耗(W)
30	130	600	90	600	65	600
50	170	870	130	870	85	870
63	200	1040	150	1040	100	1040
80	250	1250	180	1250	125	1250
100	290	1500	200	1500	145	1500
125	340	1800	240	1800	170	1800
160	400	2200	270	2200	200	2200
200	480	2600	340	2600	240	2600
250	560	3050	400	3050	280	3050
315	670	3650	480	3650	335	3650
400	800	4300	570	4300	400	4300
500	960	5100	680	5100	480	5100
630	1200	6200	810	6200	600	6200
800	1400	7500	980	7500	700	7500
1000	1700	10 300	1150	10 300	850	10 300
1250	1950	12 000	1360	12 000	975	12 000
1600	2400	14 500	1640	14 500	1200	14 500

标准　GB 20052—2006《三相配电变压器能效限定值及节能评价值》规定了配电变压器中空载损耗和负载损耗的能效限定值、目标能效限定值、节能评价值和试验方法。将S9系列产品的损耗值规定为能效限定值，将S11系列产品的损耗作为目标能效限定值及节能评价值。对油浸式变压器，S11系列及以上产品作为推荐的节能系列产品，且2010年7月1日后，不允许生产和销售低于S11系列的三相油浸式配电变压器；对干式变压器，SC10及以上产品为节能系列产品。非晶合金铁芯变压器以及符合上述标准的卷铁芯变压器、全密封变压器、箱式变压器等也是节能产品。S11系列产品的空载损耗比欧盟最高标准系列平均低3%，负载损耗比欧盟最高标准系列平均高8%；美国的最低效率指标近似于S11系列产品的水平，而最高技术可行性指标效率值高于S11系列产品0.4%～0.8%；日本的变压器总损耗平均比S11系列产品低1%。GB 20052—2013《三相配电变压器能效限定值及能效等级》规定了系列配电变压器的能效等级、能效限定值、节能评价值和试验方法，将能效等级分为3级，其中1级损耗最低；将S9系列作为淘汰目标，S11系列作为节能合格目标，S13系列及以上作为高效节能目标，进一步提高了能效限定值和节能评价值水平。

分类　中国常用的节能变压器有S11系列及以上配电变压器、干式配电变压器、非晶合金铁芯变压器、单相卷铁芯配电变压器、有载调压配电变压器。

S11系列及以上配电变压器为油浸式节能型配电变压器。油浸式变压器是将铁芯和绕组浸在绝缘液体中，以油作冷却介质（自冷、风冷、水冷），冷却效果好，一般用作火电厂升压站的主变压器，可以满足大容量的要求。1999年中国规定淘汰并停止生产S7系列（高损耗）配电变压器，2000年在S9系列的基础上开发定型了S11系列配电变压器。节能型配电变压器的磁路均匀，空载损耗低、噪声低、温升低、免维修、效率高，占地面积小，节能效果好，可供居民区、商业街道、工矿企业和农村动力及照明之用。与

S9系列变压器相比，节能型配电变压器空载损耗平均降低30%以上，空载电流平均下降70%以上；运行费用平均下降18.9%以上；噪声水平下降7～10dB，减少了噪声污染。

干式变压器的铁芯和绕组不浸渍在绝缘油中，它依靠空气对流进行冷却，具有结构简单、维护方便、防火阻燃、防尘等特点，属节能环保型产品，广泛应用于对安全运行有较高要求的场合。中国应用的主要是环氧树脂干式变压器和浸渍干式变压器。SC（B）9型比SC（B）8型干式变压器空载损耗和负载损耗平均可降低10%左右；SC（B）10型节能系列又比SC（B）9型变压器空载损耗平均降低11%，负载损耗平均降低5.5%，变压器噪声水平也明显降低。其缺点是造价较高且容量受到限制。

非晶合金铁芯变压器是用非晶合金材料代替冷轧硅钢片做成的变压器。它是20世纪80年代初在美国发展起来的一种新型低损耗变压器，具有高磁导率、低矫顽力、高电阻力、低铁损的特点。在相同的磁密下，用非晶合金做成的变压器的空载损耗（铁损）比传统的硅钢片变压器下降70%～80%，还具有过负荷能力大、温升低、噪声小的特点。中国在20世纪80年代末研制生产出非晶合金，1998年拥有了生产非晶合金铁芯的工艺设备，非晶合金铁芯配电变压器已进入规模化的生产时代，市场份额也在逐步加大。

单相卷铁芯配电变压器的铁芯采用卷铁芯工艺绕制而成。因铁芯无接缝，减少了磁阻，降低了损耗，经退火工艺处理，机械性能好，降低了噪声和温升。通常为少维护的密封式，多为柱上式，属于环保节能产品。与同容量三相变压器相比，空载损耗和负载损耗都小。它特别适用于小负荷分布分散且无三相负荷的区域。

有载调压配电变压器在负载运行中能完成分接电压切换，它可在带负荷情况下通过变压器的分接开关自动调压，保障配电变压器和低压负荷运行在最佳工况，从而降低配电变压器及低压网络的损耗，延长低压用电设备的运行寿命，提高用电设备运行效率，有较好的节能效果。

变压器经济运行 在满足供电对象用电需求和安全的条件下，采取技术或管理措施，使变压器处在电能损耗最低状态下运行的技术。合理地选择变压器运行方式和按变压器经济运行条件调整用电负荷，可以降低变压器的损耗，实现节约用电。

实现变压器经济运行的措施有：①选择节能型变压器。②调整变压器负载。居民和农村用电变压器普遍存在三相负载不平衡的情况，导致变压器损耗增大。应通过相间负载的调整使三相负载接近平衡，降低变压器损耗。③进行无功补偿，提高变压器功率因数。无功补偿可提高用电负荷的功率因数，在变压器负载有功功率不变的情况下，不同的负载功率因数（无功功率发生变化）所引起的变压器有功损耗和无功损耗，随负载功率因数的提高而下降，无功补偿还可增加变压器的容量利用率，减少变压器的电压降和变压器电压损耗率。④并联变压器经济运行。根据并联运行的技术条件，合理选择变压器的台数与数量，以保持变压器在合理的负荷率下维持高效率运行。对几台并联运行的变压器，要按每台变压器的技术性能参数，并以总损耗最小的原则，合理地分配各台变压器的负荷，且根据季节性负荷变化正确选定投入运行的变压器台数，达到提高功率因数和节电的目的。

bianzuqi

变阻器 (rheostat)

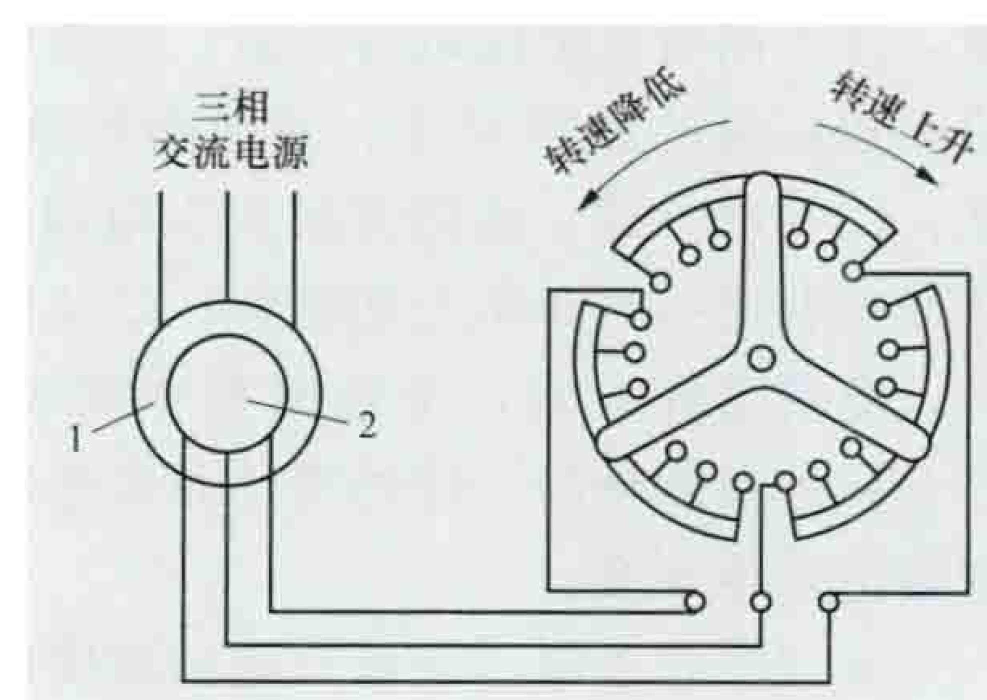
由电阻材料制成的电阻零部件和换接装置组成的电器，可在不断开电路的情况下分级地或均匀地改变阻值的电阻器。变阻器广泛用于电动机的起动、调速、制动，发电机的电压调节以及实验、控制等场合。常用的变阻器有滑线式变阻器、起动变阻器、频敏变阻器、调速变阻器和励磁变阻器。

滑线式变阻器通过接触点在密绕的金属丝上移动变更电阻值，用手柄旋转操作的称为旋臂滑线式变阻器。

起动变阻器专用于电动机起动时限制起动电流变阻器，包括液体变阻器和油浸起动变阻器。常用的液体变阻器是在金属槽内放入加盐的水，借手柄的转动调整板形电极插入电液中的深度以改变电阻值。油浸起动变阻器是将电阻元件浸入变压器油的油箱中借以散热，由于油箱有很大的比热容，所以其发热时间常数很大，适用于短时起动和制动的大、中型电动机。

频敏变阻器利用铁磁材料随频率变化而变化的特性自动改变等效阻抗值，使电动机达到平滑起动。它由铁芯和线圈组成，接于电动机转子回路中，相当于接入转子回路一个等值阻抗。频敏变阻器由于铁芯采用普通厚钢板叠成，因此，当线圈通电时即在铁芯中产生很大的、随频率变化而变化的涡流损耗，从而使它的等值阻抗随频率变化而自动改变。在电动机起动过程中，随着转速的上升，转子电流频率的下降，频敏电阻器的涡流损耗由大自动减小，从而使其等值阻抗也自动减小。这种变阻器使电动机在起动中可获得近似恒转矩的良好特性，同时因其结构简单、维护容易、造价低廉而得到广泛应用。

调速变阻器用于调节电动机的转速。用作起动和调节转速的变阻器，称为起动调速变阻器，其原理接线如图所示。



起动调速变阻器原理接线图

1—交流绕线式异步电动机定子；2—转子

励磁变阻器串联于电机的励磁绕组中，用以调节电机励磁电流。对发电机而言，它可调节发电机的电压；对电动机而言，它可调节电动机的转速。

bingwang guanli

并网管理 (connection management to power system)

对并入电力系统运行的独立发电厂或小电力系统开展的督查活动。并网指独立发电厂或小电力系统与相邻电力系统发生电气连接，进行功率交换的行为。小水电、地热、风能、太阳能、地方燃料（小窑煤）、资源综合利用等资源建设的发电厂、企业自备电厂以及以上述发电厂为电源的地方电力系统，与大电网电力系统实行并网运行后，可以有效地克服发电出力不稳、供电质量不佳、电力余缺调节能力差、抗御

事故与负荷冲击能力弱等缺点，使资源得到充分利用。并网管理的主要内容包括受理并网申请，确定并网方案，签订并网调度协议及并网购售电合同，并网运行管理。

受理并网申请　独立运行的发电厂或小电力系统拟并网运行时，应向当地电网经营企业提出书面并网申请，并提供上级批准的文件。并网申请书应说明并网的理由，并网的发电厂或小电力系统的规模、地址或供电区域、供电对象、资金与资产、主要设备或供电网络、交换的功率与电量、要求并网日期等内容。要求并网的发电厂或小电力系统应具有可靠的电力通信、调度自动化设施、并网与解网装置和保证安全的继电保护装置，有合格的运行管理人员和完整的规章制度。

确定并网方案　电网经营企业根据电力系统结构和电力系统发展规划，提出合理的并网方案，并书面答复申请并网的发电厂或小电力系统。并网方案包括并网电压，并网的变电站或线路，并网设备台数和容量，对接入电力系统的联网工程要求，继电保护配合方案、电压波动、电气短路电流计算，安全自动及计量装置，电力通信、电力调度自动化，电价与电费结算及电能质量（谐波源、冲击负荷、非对称、直流分量）等。

签订并网调度协议及并网购售电合同　电网经营企业与并网发电厂应根据国家法律、行政法规和电网管理有关规定，在并网发电前签订并网调度协议及并网购售电合同。并网调度协议应明确并网双方的权利、义务：①共同享有并网运行效益的权利，并承担调峰、调频和事故备用义务；②并网发电厂或小电力系统应承担接入电力系统的联网工程的建设和运行责任，当并网发电厂或小电力系统事故或检修时，电网经营企业应向其提供可靠的电力；③并网发电厂或小电力系统应服从电网调度部门的统一调度，遵守电力行业的规章，按上网电量依法取得收益；④违反并网协议时，违约方应承担相应的经济责任。并网购售电合同的主要内容应包括：①并网方式、电能质量和发电时间；②并网发电容量、年发电利用小时和年上网电量；③计量方式和上网、用网电价，电费结算方式；④电网提供的备用容量及计费标准；⑤合同的有效期限、违约责任和奖惩条款；⑥双方认为必须规定的其他事宜。

并网运行管理　一般由电网调度部门对并网发电厂或小电力系统的运行方式、安全稳定及经济运行等进行管理。主要包括：停机、开机及设备计划检修安排，有功与无功出力调整，节能发电及调度，继电保护及安全自动装置调整，改变电气设备运行状态的倒闸操作，电气事故处理，电力通信及调度自动化管理等。

随着国家能源政策的实施和智能电网的建设与发展，分布式电源将广泛应用于大、中型医院及宾馆、办公商务楼、学校、集中（工业、科技）园区内等。分布式电源的容量一般在几千瓦到几十兆瓦，并入用户配电网电压等级为380V或10、35kV，分布式电源可与电网并网运行，也可独立工作，且有巨大的节能效果，在并网技术上，将兼顾电网的经济性、稳定性、安全性、可靠性等多项指标要求。加强智能电网的建设，接纳分布式电源的并网运行，发展前景广阔。

见《电力系统卷》电力系统。

buduichen fuhe

不对称负荷　(asymmetric load)　在交流三相电力系统中出现的有相位差，或有幅值差，或既有相位差又有幅值差的三相功率或电流的负荷。不对称负荷可分解为正序、负序、零序三组对称分量。不对称负荷引起的三相不平衡程度一般用不对称度表示，即用负序分量与正序分量之比表示，它是衡量电能质量的指标之一。

不对称负荷中的负序电流分量，使发电机三相电流不平衡、个别相的绕组过载发热并产生与转子旋转方向相反的负序旋转磁场，因而在励磁绕组、阻尼绕组和转子本体中，感应出2倍频率的交流电流并形成交变电磁力矩，致使发电机产生振动；不对称负荷使变压器负荷较大一相绕组绝缘因过热而导致寿命缩短，并引起漏磁增加，附加损耗增大；在三相供电系统中还将引起线路损耗和线路电压损失的增加；引起电力系统中大量电动机的发热，对电子设备也会产生影响。

产生不对称负荷的原因有：①三相磁路、电路不对称，即三相阻抗不对称。如三相三铁芯柱变压器、三相架空输电线路等的三相磁路不相同会引起三相负荷不对称。②单相设备接入系统。如电力机车、单相电动机、电焊机等接入系统，在运行中都会造成三相负荷不对称。③用电设备三相负荷不对称。如炼钢电弧炉在炼钢熔化期内三相负荷经常是不对称的。

在电力系统和工业企业进行电气设计及生产运行时，应努力做到三相负荷对称。常用的方法有：①将不对称负荷分别接到不同的供电点，或在三相中进行合理分配，使其平衡，或采用平衡装置。②单相负荷也应尽量三相搭配平衡。③电力机车的牵引负荷中各牵引变电所高压侧接入电力系统时要进行换相，使机车负荷能较均匀地分配在各相上。

bujin diandongji

步进电动机　(stepping motor; stepper motor; step motor)　定子绕组按一定程序励磁时，转子按一定角位移（或直线位移）做增量运动的多相同步电动机，也是一种控制电机。步进电动机能够直接把电脉冲信号转换成直线运动或者旋转运动，它每接到一个数字脉冲信号就准确地跨进一步，所以又叫脉冲电动机、数字电动机。步进电动机的转子做成多极的，定子上嵌装有多相控制绕组，由专用电源供给电脉冲。步进电动机可以在宽广的范围内，通过改变脉冲频率来调速、快速起动、反转和制动。

早先的步进电动机是根据定位电磁铁的理论设计的，并尽一切可能去减少绕组之间的互感。后来人们发现，将定子的旋转磁通势离散成步进磁通势后，所有的同步电动机都具有步进电动机的性能，从而将步进电动机的性能指标提高到同步电动机的水平。

步进电动机的最大特点是不用位置反馈环节就能获得很高的定位精度。微电子技术、电力电子技术加上永磁材料的迅猛发展使得由步进电动机组成的增量运动控制系统不断发展。它广泛应用于计算机的外围设备、绘图机、轧钢机的自动控制、自动记录仪表和数模变换等。

步进电动机按照其结构和工作原理可分为机电式和磁电式。按照运动形式的不同，还有直线步进电动机（做直线运动）和两维步进电动机（在一平面有限区域内做两维运动）。

机电式步进电动机　由铁芯、绕组、齿轮机构等组成，见图1。当螺线管绕组通电时，产生磁力，推动其铁芯芯子运动，通过齿轮机构使输出转轴转动一角度，依靠抗旋转齿轮使输出转轴保持在新的工作位置；绕组再通电，转轴又转动一角度，依次进行步进运动。这种类型的步进电动机工作可靠，在低速时能产生很大的力矩。

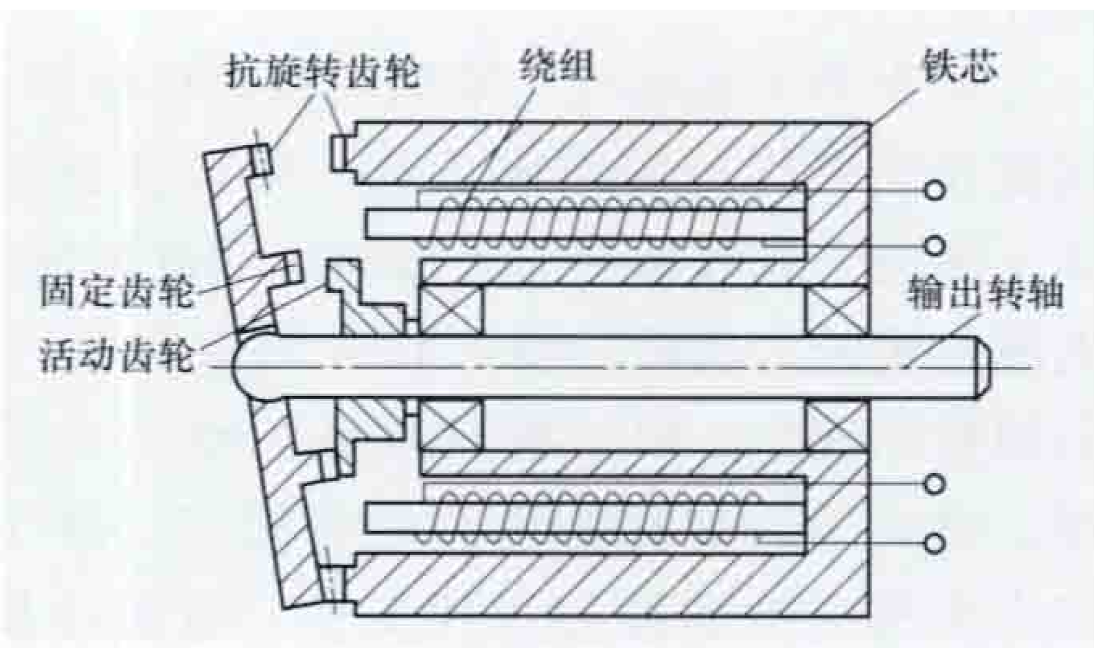


图1　机电式步进电动机基本结构

磁电式步进电动机　其结构简单，可靠性高，价格低廉，应用广泛。主要有永磁式、磁阻式和混合式3种。

永磁式步进电动机的转子有永磁体的磁极，在气隙中产生极性交替磁场，定子由四相绕组组成（见图2）。当A相绕组通电时，转子将转向该相绕组所确定的磁场方向。当A相断电、B相绕组被通电励磁时，就产生一个新的磁场方向，这时，转子就转动一角度而位于新的磁场方向，被励磁相的顺序决定了转子的运动方向。若定子励磁的变化太快，转子将不能和定子磁场方向的变化保持一致，转子即失步。起动频率和运行频率较低，是永磁式步进电动机的一个缺点。永磁式步进电动机消耗功率较小，步距角较大。

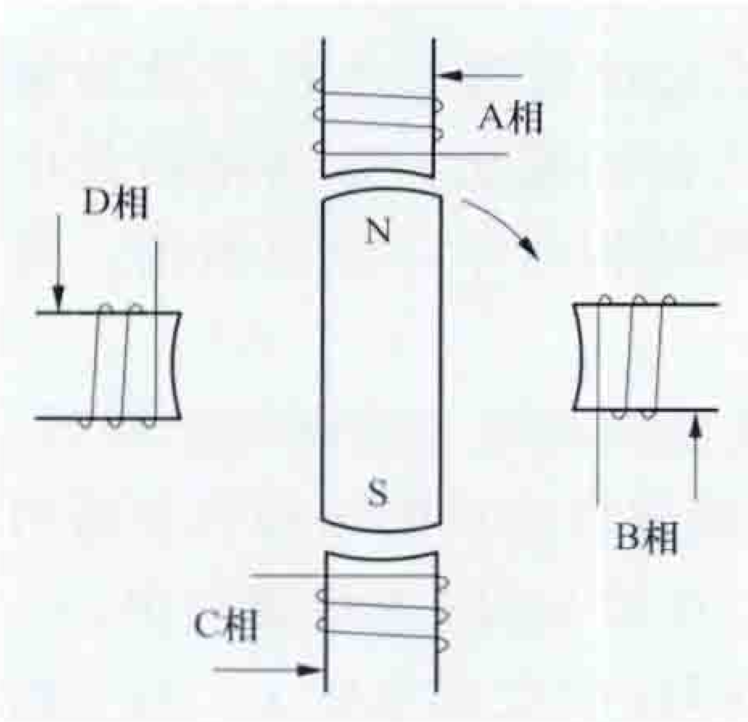


图2　永磁式步进电动机基本原理图

20世纪80年代初，出现了转子是盘式的永磁盘式步进电动机，使步距角及工作频率达到磁阻式步进电动机的水平。

磁阻式步进电动机的定、转子铁芯的内外表面上设有按一定规律分布的相近齿槽，利用定、转子铁芯齿槽相对位置变化引起磁路磁阻的变化，从而产生转矩。其转子铁芯由硅钢片或软磁材料做成，当定子某相被励磁时，转子将运动到使磁路磁阻最小的位置。当另一相被励磁，转子转到另一位置，使磁路磁阻为最小时，电动机就停止转动。这时，转子转过一个步距角 θ_b，即

$$\theta_b=\frac{360°}{NZ_R}$$

式中 N 为转子转过一个齿距的运行拍数；Z_R 为转子齿数。

磁阻式步进电动机结构形式较多。定子铁芯有单段式、多段式；磁路有径向、轴向；绕组相数有三相、四相、五相。

磁阻式步进电动机步距角可做到1°～15°，甚至更小，精度容易保证，起动与运行频率较高，但功耗较大，效率较低。

混合式步进电动机的定、转子铁芯结构与磁阻式步进电动机相似。转子有永磁体在气隙中产生单极性磁场，此磁场还被转子上软磁材料的齿槽调制。

混合式步进电动机兼有永磁式步进电动机与磁阻式步进电动机两者的优点，步距角小，精度高，工作频率高，且功耗小，效率高。



cesu fadianji

测速发电机　（tachogenerator；tachometer generator）

将转速转换成电信号的检测元件，是一种控制电机。它输出的信号（电压值或频率）与转速成正比例关系，某些测速发电机的输出信号还能反映转向。它广泛用于各种速度控制或位置控制系统，在自动控制系统中作为检测速度的元件，以调节电动机转速或通过反馈来提高系统稳定性和精度；在解算装置中可作为微分、积分元件，也可作为加速或延迟信号用，或用来测量各种运动机械在摆动或转动以及直线运动时的速度。测速发电机有直流和交流两大类。此外，频率测速发电机输出信号的频率与转子转速成正比。直线测速发电机是检测直线运动速度，并转换为与之成正比电信号的测速发电机。

直流测速发电机　采用直流电机结构的测速发电机，其输出直流电压的大小正比于转速，极性与转向有关。直流测速发电机按励磁方式可分为电磁式和永磁式。按电枢结构不同可分为有槽电枢、无槽电枢、空心电枢和圆盘式印制绕组电枢。电磁式直流测速发电机采用他励式，不仅复杂而且输出电压变化较大，用得不多。永磁式直流测速发电机的定子用高性能永久磁钢构成，输出电压变化小，受温度变化的影响小，线性误差小，输出斜率（在规定条件下，单位转速产生的输出电压）高。永磁式直流测速发电机在 20 世纪 80 年代因新型永磁材料的出现而发展较快，其中有槽电枢的永磁式直流测速发电机应用较多。永磁式低速直流测速发电机的工作转速可低达每分钟数百转，甚至十转以下，或有较高的输出斜率。无刷直流测速发电机没有电刷换向器结构，由电机和电子电路结合。

直流测速发电机在恒定磁场下，旋转的电枢导体切割磁通，就会在电刷间产生感应电动势。空载时，电机的输出电压与转速成正比。负载时，由于负载电阻、电枢电阻和电刷接触电阻引起的电压降，温度变化、磁极和电枢的磁滞及涡流的影响，电枢反应、齿槽效应以及换向过程对感应电动势瞬时值的影响等，使电机输出特性［输出电压 U 与转速 n 的关系，即 $U=f(n)$］的线性度变差；电刷与换向器的接触压降导致产生不灵敏区。

直流测速发电机的主要优点是：输出为零时，无剩余电压；输出斜率大，负载电阻较小；温度补偿较容易。主要缺点是：由于有电刷和换向器，构造和维护比较复杂，摩擦转矩较大；输出电压有纹波；正反转输出电压不对称；对无线电有干扰。

交流测速发电机　采用交流电机结构的测速发电机，其输出交流电压幅值与转速成正比。交流测速发电机分为同步和异步两种。

同步测速发电机　采用同步电机结构，输出交流电压的幅值和频率均与转速成正比。同步测速发电机又分为永磁式、感应子式和脉冲式。永磁式交流测速发电机不需要励磁电源，转子为永磁励磁，具有结构简单、易于维修的优点，但极数比较少，用二极管整流后纹波比较大，滤波比较困难。感应子式交流测速发电机按定、转子之间可变磁阻效应产生感应电动势的原理工作，极数比较多，整流后纹波比较小，且便于滤波，但结构复杂，维修困难。永磁式交流测速发电机和感应子式交流测速发电机既可用输出电压的幅值去反映转速，也可用输出电压的频率去代表转速。电压是模拟量，需要整流和滤波；频率是数字量，可以直接输入微处理机。如果将幅值和频率合起来使用，就有可能实现高灵敏度的转速检测，但不能判别旋转方向，这一点不如直流测速发电机。脉冲式交流测速发电机以脉冲频率作为输出信号，可以直接输入微处理机，是测速码盘中每转发出脉冲数较少的一种。其结构简单，坚固耐用，可以判别旋转方向。

异步测速发电机　输出交流电压频率与励磁频率相同，其幅值与转子转速成正比。异步测速发电机的结构与普通两相笼型感应电动机相同，定子上互差 90°的两相绕组中，一相为励磁绕组，接在 50Hz 或 400Hz 的交流电源上，另一相输出转速信号。当转子堵转时，定子励磁绕组在转子多相对称绕组中只产生变压器电动势，于是转子磁通势和定子磁通势方向相反，起去磁作用，与这两个磁通势垂直的输出绕组中不感生电动势。当转子转动后，笼型绕组中除产生变压器电动势外还将产生切割电动势。由切割电动势产生的磁通势具有交轴的性质，它交链输出绕组并在其中感生与转速成正比的信号电压。信号电压的频率和电源电压相同，信号电压对电源电压的相位差随旋转方向改变，很适合与交流伺服电动机配套使用。

chacuo dianliang jisuan

差错电量计算　（adjustment to electricity consumption）

电能计量装置在错误接线时测得的电量值与正确接线时测得电量值之差的计算分析过程。差错电量因电能计量差错引起，影响对用户的电费结算。计算差错电量是供电企业对用户实行退补电费的依据。

电量差错的原因　造成电能计量不准确而引起电量差错的因素有电流、电压互感器倍率不符和绕组极性接错，电流或电压回路有短路或断路，电流线和电压线相互不对应等。对于单相电能表和直接接入式三相电能表（用于低压小用户），接线较简单，错误容易发现和改正，但对经互感器接入的电能表，因接线复杂较容易发生差错。

差错电量计算方法　差错电量（ΔW）亦称退补电量，可按下式计算

$$\Delta W = W_0 - W$$

$$W_0 = G_x W$$

式中 W 为在错误接线期间电能表测得的电量；W_0 为同时期内电能表接线正确时测得的电量，实际消耗电量；G_x 为电

量更正系数，可用测试法或计算法求得。

测试法是用标准表测出错误接线时电能表计量的功率 P'，再用标准表测出更正后电能表所计量的正确功率 P，则

$$G_x = P/P'$$

计算法则是先求出错误接线时的功率表达式，通过下式可得电量更正系数为

G_x＝正确接线功率表达式/错误接线功率表达式

当已知三相三线有功电能表接线时，可由表中查得相应的 G_x。

三相三线有功电能表错误接线更正系数

转动方向（负载为感性）	接线方式	两元件测得的功率	有功功率	错误接线更正系数 G_x
正转	U_{AB} I_A U_{CB} I_C	$UI[\cos(30°+\varphi)+\cos(30°-\varphi)]$	$\sqrt{3}UI\cos\varphi$	1
	U_{CA} $-I_A$ U_{BA} $-I_C$	$UI[\cos(30°-\varphi)+\cos(90°-\varphi)]$	$\sqrt{3}UI\cos(60°-\varphi)$	$\frac{2}{1+\sqrt{3}\tan\varphi}$
	U_{BC} $-I_C$ U_{AC} I_A	$UI[\cos(30°-\varphi)+\cos(30°-\varphi)]$	$2UI\cos(30°-\varphi)$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}+\tan\varphi}$
	U_{BC} I_A U_{AC} $-I_C$	$UI[\cos(90°-\varphi)+\cos(30°+\varphi)]$	$UI\cos(30°-\varphi)$	$\frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3}+\tan\varphi}$
	U_{AB} I_C U_{CB} $-I_A$	$UI[\cos(90°-\varphi)+\cos(90°-\varphi)]$	$2UI\sin\varphi$	$\frac{\sqrt{3}}{2\tan\varphi}$
	U_{AB} $-I_A$ U_{AC} $-I_C$	$UI[\cos(150°-\varphi)+\cos(30°-\varphi)]$	$UI\sin\varphi$	$\frac{\sqrt{3}}{\tan\varphi}$
停转	U_{AB} I_C U_{CB} I_A	$UI[\cos(90°-\varphi)+\cos(90°+\varphi)]$	0	
	U_{AB} $-I_C$ U_{CB} $-I_A$	$UI[\cos(90°+\varphi)+\cos(90°-\varphi)]$	0	
	U_{BC} I_C U_{AC} I_A	$UI[\cos(150°+\varphi)+\cos(30°-\varphi)]$	0	
	U_{BC} $-I_C$ U_{AC} $-I_A$	$UI[\cos(30°-\varphi)+\cos(150°+\varphi)]$	0	
	U_{CA} I_C U_{BA} I_A	$UI[\cos(30°+\varphi)+\cos(150°-\varphi)]$	0	
	U_{CA} $-I_C$ U_{BA} $-I_A$	$UI[\cos(150°-\varphi)+\cos(30°+\varphi)]$	0	
反转	U_{CA} I_A U_{BA} I_C	$UI[\cos(150°+\varphi)+\cos(90°+\varphi)]$	$-\sqrt{3}UI\cos(60°+\varphi)$	$\frac{-2}{1+\sqrt{3}\tan\varphi}$
	U_{BC} I_C U_{AC} $-I_A$	$UI[\cos(150°+\varphi)+\cos(150°+\varphi)]$	$-2UI\cos(30°-\varphi)$	$\frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{3}+\tan\varphi}$
	U_{BC} $-I_A$ U_{AC} I_C	$UI[\cos(90°+\varphi)+\cos(150°-\varphi)]$	$-UI\cos(30°-\varphi)$	$\frac{-2\sqrt{3}}{\sqrt{3}+\tan\varphi}$
	U_{AB} $-I_A$ U_{CB} $-I_C$	$UI[\cos(150°-\varphi)+\cos(150°+\varphi)]$	$-\sqrt{3}UI\cos\varphi$	-1
	U_{AB} $-I_C$ U_{CB} I_A	$UI[\cos(90°+\varphi)+\cos(90°+\varphi)]$	$-2UI\sin\varphi$	$\frac{-\sqrt{3}}{2\tan\varphi}$
	U_{AB} I_A U_{CB} $-I_C$	$UI[\cos(30°+\varphi)+\cos(150°-\varphi)]$	$-UI\sin\varphi$	$\frac{-\sqrt{3}}{\tan\varphi}$
转向不定	U_{BC} $-I_A$ U_{AC} $-I_C$	$UI[\cos(90°+\varphi)+\cos(30°+\varphi)]$	$\sqrt{3}UI\cos(60°+\varphi)$	$\frac{2}{1-\sqrt{3}\tan\varphi}$
	U_{BC} I_A U_{AC} I_C	$UI[\cos(90°-\varphi)+\cos(150°-\varphi)]$	$-\sqrt{3}UI\cos(60°+\varphi)$	$\frac{-2}{1-\sqrt{3}\tan\varphi}$
	U_{CA} I_C U_{AB} $-I_A$	$UI[\cos(30°+\varphi)+\cos(30°+\varphi)]$	$2UI\cos(30°+\varphi)$	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}-\tan\varphi}$
	U_{CA} $-I_C$ U_{BA} I_A	$UI[\cos(150°-\varphi)+\cos(150°-\varphi)]$	$-2UI\cos(30°+\varphi)$	$\frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{3}-\tan\varphi}$
	U_{CA} $-I_A$ U_{BA} I_C	$UI[\cos(30°-\varphi)+\cos(90°+\varphi)]$	$UI\cos(30°+\varphi)$	$\frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{3}-\tan\varphi}$
	U_{CA} I_A U_{BA} $-I_C$	$UI[\cos(150°+\varphi)+\cos(90°-\varphi)]$	$-UI\cos(30°+\varphi)$	$\frac{-2\sqrt{3}}{\sqrt{3}-\tan\varphi}$

注：接线方式栏中第一行表示第一元件所接电压、电流；第二行表示第二元件所接电压、电流。

当已知电能表在错误接线状态下的基本误差γ时，差错电量为

$$\Delta W=W_0-W=\left[G_x\left(1-\frac{\gamma}{100}\right)-1\right]W$$

式中ΔW为正值时，表明用户应补缴电费；ΔW为负值时，表明应退给用户电费。

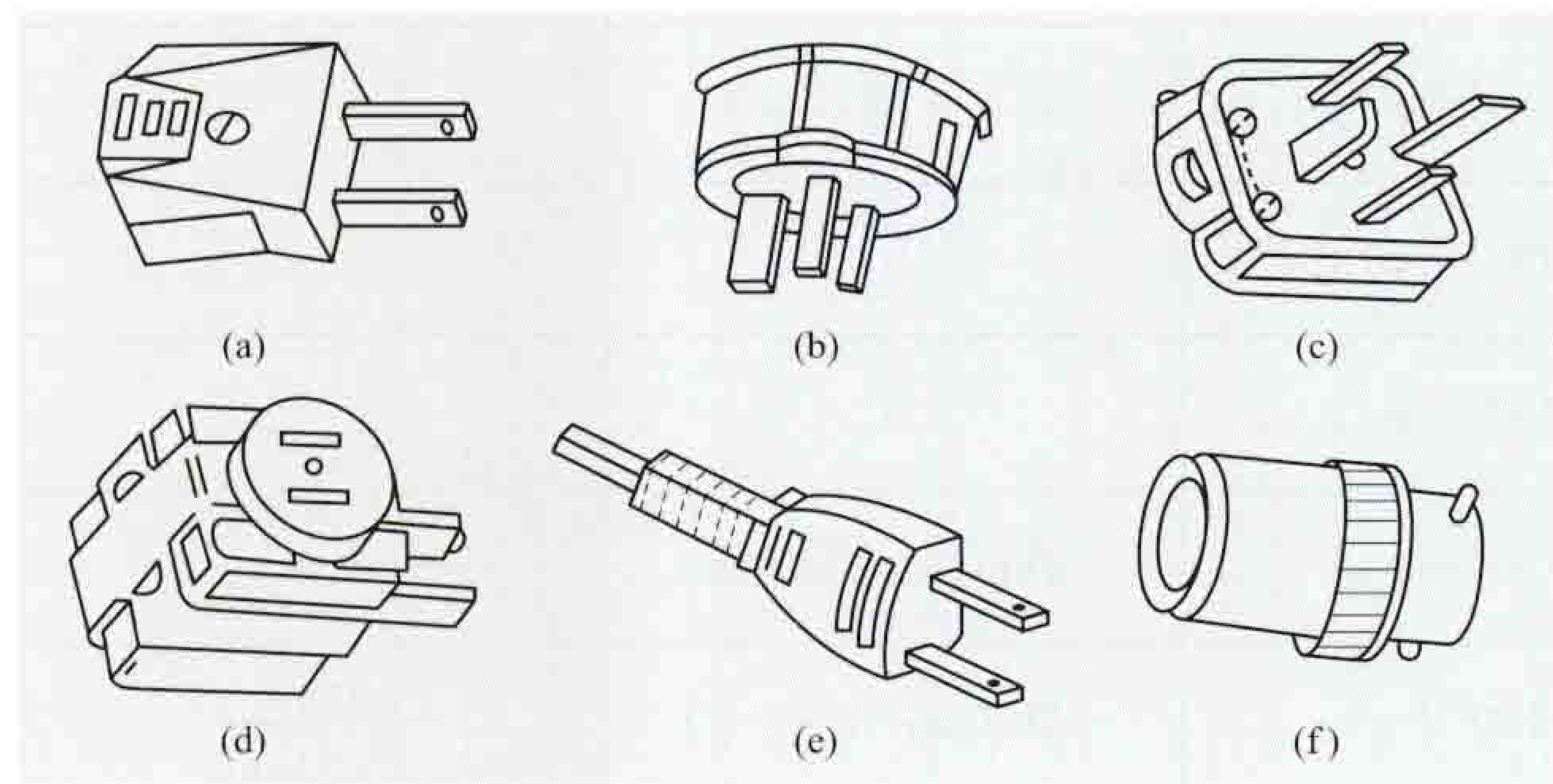
当电流、电压互感器倍率不符时，其差错电量为

ΔW＝倍率正确时的电量－倍率错误时的电量

chatou

插头 (plug) 与插座配套使用的元器件。插头用于移动式低压小容量电气设备、仪器和家用电器等引接电源。

根据电源极数的不同，插头可分为单相两极式（相线、中性线）、单相三极式（相线、中性线、地线）、三相四极式（A、B、C三相线及中性线）。按照使用要求的不同，插头可分为：①插接式插头，即普通插头。②分路式插头，用于分路引出及不同形式插销的转换。③不可重接式插头，即将电线与插头焊牢，与绝缘外壳制成不可拆卸的连接插头。④引挂式插头，包括插口灯座插头、防水插头等。⑤带开关的插头，在多个电器同时使用一个插座时，能够单独控制每个电源的开关。开关的位置特殊，拔下电源时顺便就会关闭开关，可以防止电火花飞溅。插头上的开关还附带LED（发光二极管灯），提示是否已经接通电源。常用插头外形如图所示。



常用插头

(a) 单相两极式；(b) 单相三极式；(c) 三相四极式；
(d) 单相分路式；(e) 不可重接式；(f) 引挂式

插头形式多样，结构各异，不同国家和地区有不同的要求和标准。中国生产的插头，工作电压为50，250，500V，最大工作电流三相式不超过25A，单相式不超过15A，并规定采用扁形插脚。

为了保证用电安全，除了有绝缘外壳及采用安全电压的用电器具可采用两极插头外，其他有金属外壳及可触及金属部件的电器都应采用有接地线的单相三极式插头。

chazuo

插座 (socket) 与插头配合，装在出线盒上供插接用的元器件。插座直接与电源相连接，安装在车间、试验室、办公室和居室的固定或移动的电气出线盒上，供各种低压电气设备、仪器、移动式低压小容量电器以及家用电器等引取电源，或兼作分路引接电源的连接器件。插座接触部分的材料必须具有优良的弹性和导电性，一般使用磷青铜、铍铜、黄铜及镍铜锌合金等。

插座分为单相两极式（相线、中性线）、单相三极式（相线、中性线、地线）、三相四极式（A、B、C三相及中性线）。按使用条件和安装要求可分为：移动式插座，即普通插座，必要时可临时挂在钉子上使用；固定装置式插座，包括明装式和暗装式（又称嵌入式插座）。按其功能又可分为：线路连接插座，供临时延长导线长度；电源分路插座，可同时供2～10只插头引接电源分路线，供给小型用电设备；插销式转换插座，如用于插口灯头上的三通插销插座等。有的附有开关，可分合电路；有的带有指示灯，可显示电路的通断状态。常用插座外形如图所示。



常用插座

插座形式虽多样，但其外壳多由陶瓷或塑料制成，带电零部件不外露，以保证安全用电。中国生产的插座的参数与插头配套，工作电压有50，250，500V，最大工作电流三相式不超过25A，单相式不超过15A。插座多采用扁形插孔。

chanquan fenjiedian

产权分界点 (division point of property) 供用电双方供电设施的相互连接处，即按其供电设施资产归属在地理上或电气上分割的位置。一般情况下，产权分界点即是供用电合同的履行地点，且根据供用电设施的资产归属，明确了供用双方对供电设施应承担的维护管理和民事责任的范围。

在中国，除另有约定外，通常供电设施的产权分界点划分原则为：①公用低压线路供电的，以供电接户线用户端最后支持物为分界点，支持物属供电企业。②10kV及以下公用高压线路供电的，以用户厂界外或配电室前的第一断路器或第一支持物为分界点，第一断路器或第一支持物属供电企业。③35kV及以上公用高压线路供电的，以用户厂界外或用户变电站外第一基电杆为分界点，第一基电杆属供电企业。④采用电缆供电的，本着便于维护管理的原则，分界点由供电企业与用户协商确定。⑤产权属于用户且由用户运行维护的线路，以公用线路分支杆或专用线路接引的公用变电站外第一基电杆为分界点，专用线路第一基电杆属用户。

在电气上的具体分界点，一般由供用电双方以供用电合同的形式确定。

chanye yongdian

产业用电 (electricity consumption of primary industry)

国民经济中进行生产、制造和服务等活动所消费电能的行为。相同性质的经济活动的所有单位集合构成了产业（或行业），不同产业活动所消费的电能形成了用电结构，不同产业的用电特点及对供电的要求也不尽相同。

产业划分　根据社会生产活动历史发展的顺序将产业划分为第一产业、第二产业和第三产业，这是世界通用的分类方法。直接作用于自然界生产初级产品的产业为第一产业；将初级产品加工成满足人类生产生活需要的物质资料的产业为第二产业；提供满足人类物质资料需要以外的产品和服务的产业为第三产业。国家统计局根据 GB/T 4754—2011《国民经济行业分类》划分了中国的三个产业范围：①第一产业：农、林、牧、渔、水利业。②第二产业：采矿业，制造业，电力、燃气及水的生产和供应业，建筑业。③第三产业：除第一、二产业以外的其他行业，包括交通运输、仓储和邮政业，商业、住宿和餐饮业，信息传输、计算机服务和软件业，金融、房地产、商务及居民服务业，公共事业及管理组织等。

用电概况　中国的产业用电发展进程：①1949～1978年，农村地区仅有少量的排灌用电，轻工业以纺织工业为主，重工业以采煤工业为支柱，交通运输和市政公用设施的用电也很少。1978 年，农村用电和工业用电比重分别为 13.67%和79%，分别是 1949 年的 23.57 和 1.14 倍。②1978～1986 年，全国用电结构比较稳定。1986 年，第一产业用电比重为 8.38%，用电对象主要是农业用电和排灌用电；第二产业用电比重为79.33%，其中工业用电比重 78.41%，轻工业和重工业用电比重分别为工业用电的 19.09%和 59.32%，主要是采掘业中的煤炭、石油及天然气、黑色和有色金属的开采用电；制造业中的纺织（见图 1），烟草，造纸，化学工业，建材及非金属，黑色、有色和金属制品，机械工业（见图 2），交通运输等用电；第三产业用电比重为 6.19%，主要是运输邮电通信、商业饮食仓储及社会公共服务用电等。③1986 以后，产业结构明显改善，工业用电仍占主导地位。第一产业用电比重相对稳定，并呈缓慢下降趋势；第二产业用电比重先降后升；第三产业发展速度很快，用电比重持续上升。2010年，第一产业、第二产业、第三产业用电量同比增长分别为 3.89%、15.88%和 13.56%，用电比重分别为 2.33%、74.88%和 10.66%，其中：工业用电比重为 73.73%，轻工业和重工业用电比重分别为工业用电的 17.23%和 82.77%。“十一五”期间，第一产业用电量年均增长为 5.26%，用电比重从 2005 年的 3.05%持续下降到 2010 年的 2.33%；第二产业用电量年均增长为 10.99%；第三产业用电量年均增长为 12.15%，高于第二产业用电量年均增长 1.16 个百分点。2001～2012 年各产业及城乡居民生活用电情况见表。



图 1　纺织生产线



图 2　轿车生产流水线

2001～2012 年各产业及城乡居民生活用电情况（亿 kW·h）

年份	全社会用电量		第一产业		第二产业		第三产业		城乡居民	
	用电量	比上年增长（%）	用电量	比重（%）	用电量	比重（%）	用电量	比重（%）	用电量	比重（%）
2001	14 683	9.04	573	3.90	10 635	72.43	1636	11.14	1839	12.52
2002	16 386	11.6	590	3.60	11 957	72.97	1838	11.22	2001	12.21
2003	18 891	15.29	596	3.15	13 949	73.84	2108	11.16	2238	11.85
2004	21 761	15.19	603	2.77	16 275	74.79	2427	11.15	2456	11.29
2005	24 781	13.88	756	3.05	18 676	75.36	2524	10.19	2825	11.40
2006	28 368	14.47	832	2.93	21 474	75.70	2822	9.95	3240	11.42
2007	32 565	14.79	863	2.65	24 909	76.49	3185	9.78	3608	11.08
2008	34 380	5.49	879	2.56	25 920	75.39	3499	10.18	4082	11.87
2009	36 595	6.44	940	2.57	27 136	74.15	3944	10.78	4575	12.50
2010	41 999	14.76	976	2.33	31 450	74.88	4479	10.66	5094	12.13
2011	47 026	11.97	1013	2.16	35 288	75.03	5105	10.86	5620	11.95
2012	49 657	5.60	1003	2.02	36 733	73.97	5693	11.46	6228	12.54

用电特点　各产业的用电负荷特性反映了不同的用电特点。

第一产业用电是以农业及其服务业用电为主体的电力消费结构，在全社会用电量中的比重最低。其特点：①季节性强、负荷密度小、地区差异大；②年用电最大负荷利用小时数低，用电功率因数低；③日负荷变化相对较小，但随农作物生长期，在月内、季度内和年度内，用电负荷变化大，负荷率曲线呈波动状；④输电距离远，用电分散，每户的用电量小。

第二产业用电主要是工业用电，具有用电量大、用电负荷比较稳定的特点，但工业用电的各行业之间，用电特点也不尽相同。主要特点：①大部分工业用电负荷受季节性变化的影响较小，用电负荷较为均衡且多为连续性生产企业，负荷曲线较平稳，负荷率高。②采掘业的用电负荷率较低，自然功率因数低，对电气设备及供电可靠性要求高。③冶炼业用电负荷曲线平稳，负荷率高，冲击负荷、不对称负荷对电力系统产生干扰。④化工生产连续性强，用电负荷集中，用电量大，负荷率可达95%以上。但具有高温、高压、易燃、易爆、腐蚀、毒害等危险因素，一旦停电，将会造成化工装置爆炸、起火，人身中毒等恶性事故。⑤半导体工业的生产设备和生产过程对电能质量十分敏感。⑥建筑业用电地点流动性大，露天和高空作业多，且多为临时用电，易发生电气事故。

第三产业用电设备和应用范围发展迅速，对社会及人民生活有较大影响。主要特点：①用电时间相对集中在电网负荷高峰期，存在非线性负荷、不对称负荷，对电能质量敏感；②交通运输、金融、商业、信息传输、服务及生活服务业等已逐渐渗透人们日常生活，对供电可靠性要求越来越高。

对供电的要求　根据各产业用电特点，供电时需考虑：①按用电负荷等级进行供电方式配置。对重要负荷应采用多回路高电压等级供电，且配置备用电源、保安电源和非电保安措施。②矿井供电电源应采用分列运行方式，带电备用电源的变压器宜热备用；若冷备用，必须保证备用电源能及时投入正常运行，保证主要通风机等在10min内可靠起动和运行。③对电能质量敏感、供电可靠性要求高的，应采用专线供电和多路电源供电，在各路电源之间使用快速切换开关。④必要时选用特殊性能的电气设备。如：井下矿应选用防爆型电气设备，露天矿则要求电气设备的绝缘既能耐高温又能耐低温，既坚固又便于移动；化工、纺织工业要求电气设备具有防腐蚀、防潮、阻燃等特性。

changwang zaozhiji diankong xitong

长网造纸机电控系统

（electric drive control system for paper machine）　用于实现长网造纸机正常运转的电力拖动及控制等电路组合的整体。长网造纸机是连续地把纸浆变为纸张的机器。它由网部（由此而得名）、压榨部、干燥部、压光机、卷纸机等组成，其生产流程如图1所示。

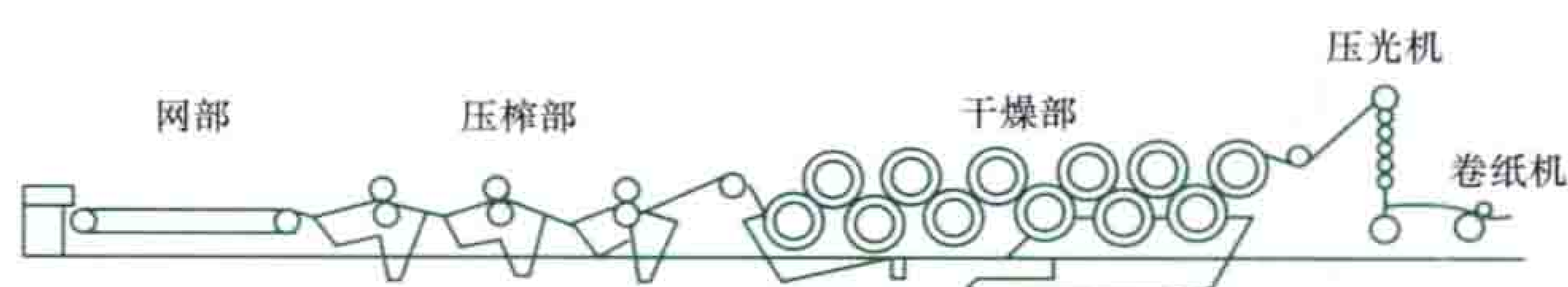


图1　长网造纸机生产流程

生产工艺要求　造纸生产工艺要求长网造纸机能以多种速度做单方向电动运转，其速度调节比一般为2～5。为使纸张均匀一致，要求造纸机的运行速度保持稳定，其稳速精度要求优于0.1%～0.3%。这些指标为长网造纸机总的调速要求。

由于纸张在各个分部加工过程中可能伸长或缩短，要求各分部之间的速度差在一定范围内可调，一般为运行速度的±（5%～7%），并要求保持优于0.1%～0.3%的精度。这些指标为分部间相对速度调速要求。

长网造纸机的传动方式分总轴传动和分部传动两类。采用锥轮的总轴传动方式示意见图2。其特征为设有与造纸机平行安装的一根主传动轴，又称总轴。主轴由调速电动机传动，调节该电动机转速就能改变造纸机的总速度。各分部通过与主轴连接的锥形皮带轮或其他无级变速装置来传动，并进行分部间相对速度的调整。为方便各分部的起停，各分部都单独装有离合器。多电动机分部传动方式示意见图3。造纸机的每一独立分部都由一台电动机带动，每台电动机都有其独立的控制系统，其控制性能应满足上述总调速要求和各分部间相对速度的调速要求。

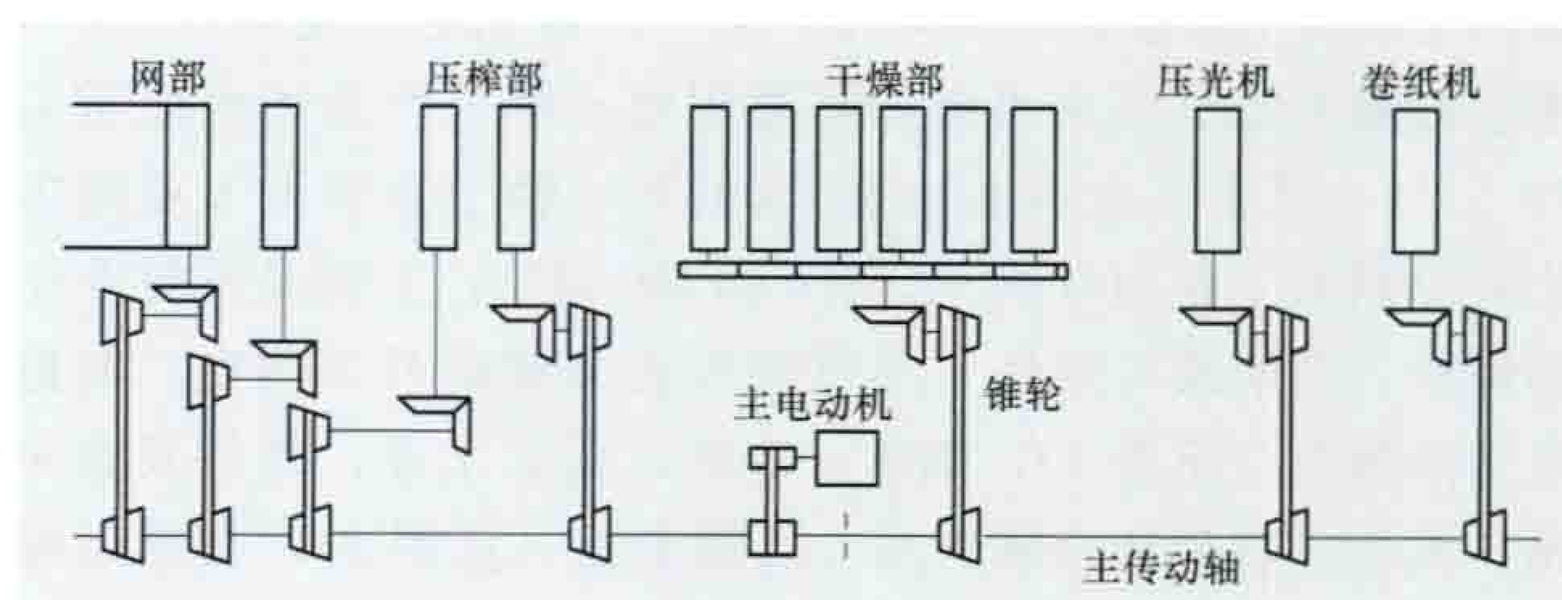


图2　采用锥轮的总轴传动方式示意图

电控系统　长网造纸机电控系统包括直流传动与交流传动的电控系统。

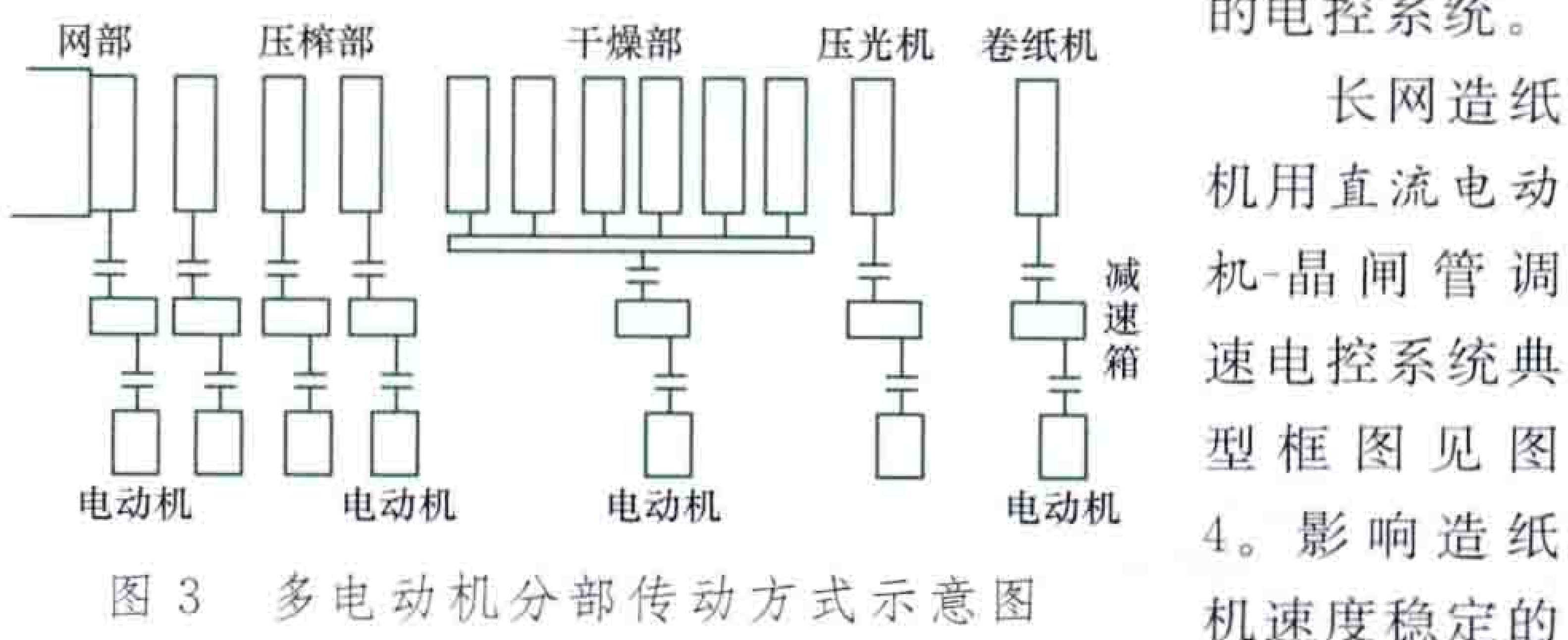


图3　多电动机分部传动方式示意图

长网造纸机用直流电动机-晶闸管调速电控系统典型框图见图4。影响造纸机速度稳定的主要因素为造纸机工艺参数变化，如网部的真空度、压榨部压力的变化及电网电压的变化等。为此电控系统设计成转速负反馈（克服负载变化造成的转速变化）和电流负反馈（克服电网电压变化引起的电流变化）的双闭环控制系统。当造纸机工艺参数变化引起转速变化时，其变化量通过转速调节器进行调节。当电网电压变化引起电流变化时，其变化量经电流调节器进行调节，最终将转速误差减到很小。（见晶闸管相位控制直流调速）

为保证造纸机的稳速精度，可选用高精度测速发电机或高精度转速传感器。造纸机的电控系统中普遍采用了频率反馈控制或数字反馈控制。

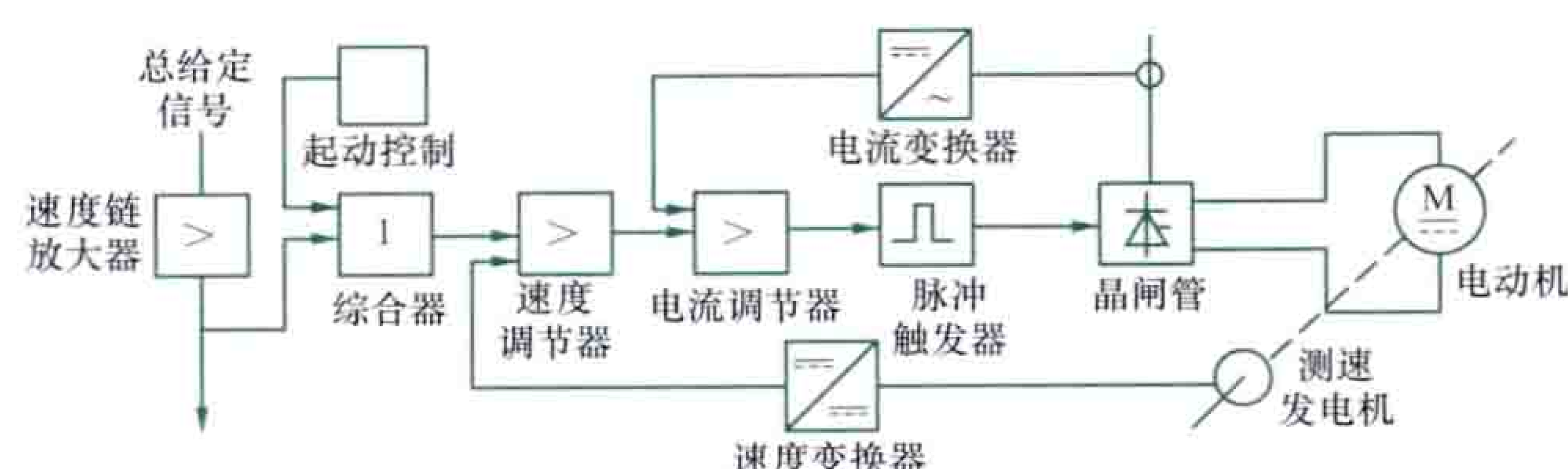


图 4 分部传动长网造纸机用直流电动机-晶闸管调速电控系统典型框图

交流电动机变频调速电控系统已用于长网造纸机上，并且已经逐步取代造纸机直流传动系统。（见变频调速）

changkaishi kaiguangui

敞开式开关柜 (open type switchgear cubicle)

能明显地看到柜内各元件的开关柜，又称开启式开关柜。其外壳或隔板用网门结构，没有防护等级的要求，离地2.5m高的带电元件还允许暴露在柜体外面。敞开式开关柜结构简单，制造方便，价格便宜，且能明显地看见进、出线及母线隔离开关的分、合状态。敞开式开关柜的缺点：①门上没有联锁装置，容易使人误入带电间隔；②网门结构在开关柜发生事故时，会危及柜外人员的人身安全；③所需空间较大。为此，将网门改为铁门，并增设观察窗，称为半封闭式开关柜。有的还增加了防误操作闭锁装置。20 世纪 90 年代开始，敞开式开关柜已逐渐为封闭式开关柜所取代。

chaobiao zhouqi

抄表周期 (meter reading cycle)

按照重复的规律，连续两次抄录贸易结算电能表读数所间隔的时间。抄表周期由供用电双方在供用电合同中约定。不同类型的用户抄表周期不尽相同，一般与电费结算周期一致，抄表周期一经确定不应随意调整，否则会影响电费计收、线损率、功率因数等的正确计算。

在中国，确定抄表周期的原则为：①除居民用户外，一般为每月一次。对居民客户可根据实际情况实行双月抄表。②对用电量较大的用户可实行每月多次抄表。③对临时用电客户、租赁经营用电客户等，视其电费收缴风险程度，实行每月多次抄表。

chaoshengbo diandongji

超声波电动机 (ultrasonic motor)

利用压电陶瓷材料的逆压电效应，把超声频率的交变电能转换为机械能的直接驱动型电动机。与传统电动机相比，超声波电动机具有结构简单，响应速度快，噪声低，低速大转矩，控制特点好，断电自锁，不受磁场干扰，运动准确，适应低温、真空等特殊环境等特点。因其功率容量等级较低，实际应用领域还比较有限，在机器人、计算机、汽车、航空航天、精密仪器仪表、伺服控制等领域将有广阔的应用前景。

结构及工作原理 超声波电动机由定子（振动体）和转子（移动体）两部分组成，电动机定子由弹性体和压电体构成，转子为一个金属板，电动机中既没有线圈，也没有永磁体，如图 1 所示。定子和转子一般通过压力作用紧密接触，为了减少定、转子之间相对运动产生的磨损，通常在两者之间加一层摩擦材料。对压电体中的压电陶瓷元件施加一定的高频交变电压，压电陶瓷会随着高频电压的幅值变化而膨胀或收缩，这种现象被称为压电陶瓷的逆压电效应。压电陶瓷的膨胀和收缩在定子弹性体内激发出超声波振动，这种振动传递给与定子紧密接触的摩擦材料可以驱动转子运动，从而实现电能到机械能的转换。也有部分超声波电动机定子与转子不直接接触，而是在它们之间填充液体或气体介质。当定子振动时能同时引起介质的振动，在介质与转子的接触面就形成了摩擦力，从而驱动转子运转，这类电动机称为非接触式超声波电动机。非接触式超声波电动机是以牺牲转矩为代价的，其驱动力通常都很小。

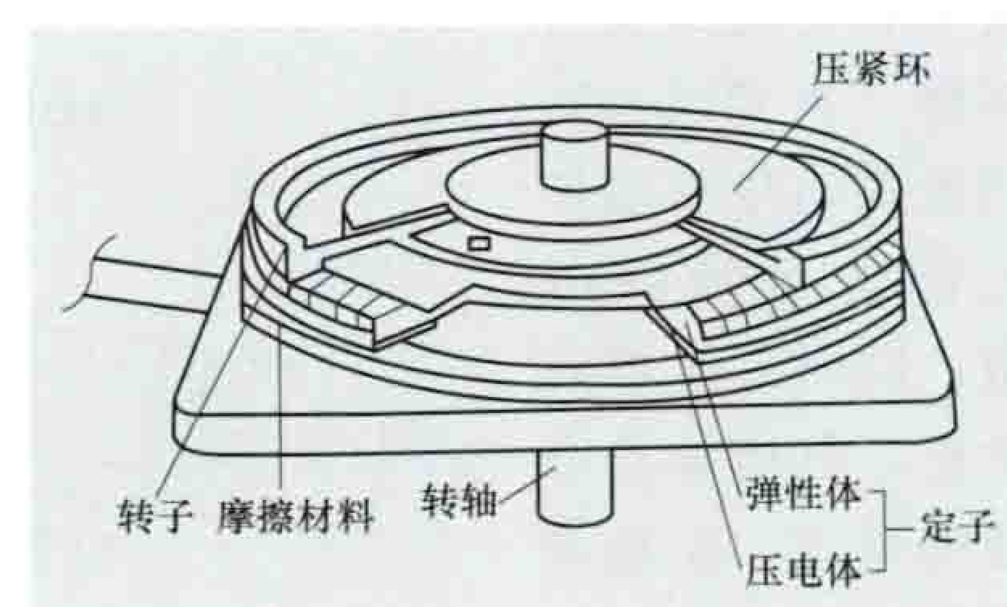


图 1 环形行波型超声波电动机结构示意图

分类 超声波电动机按运动形式可分为旋转式、直线式和多自由度运动式；按压电陶瓷振动形式可分为行波型和驻波型；按定转子外形结构的差异可分为环形、直线导轨形、楔形、扭转连接器型等。以环形行波型、直线导轨形行波型、楔形驻波型和多自由度超声波电动机应用较为广泛。

环形行波型超声波电动机　如图 1 所示，它由底部粘接着压电陶瓷元件的环形定子和环形转子构成。对压电陶瓷元件施加一定的高频交变电压，在定子弹性体中形成沿圆周方向的弯曲行波。对定、转子施加一定的预压力，转子受到与行波传播方向相反的摩擦力作用而产生连续转动，电动机得以运行。由于其外形扁平，又称盘式行波型超声波电动机。

直线导轨形行波型超声波电动机　如图 2 所示，把金属两端焊接起来形成田径跑道状的定子轨道，并在上面设置具有压紧装置的移动体（滑块）。压电陶瓷片粘在导轨的背面，通过两相时间、空间互差 90°电角度的压电陶瓷横向伸缩，在封闭的弹性导轨中激发出由两个同频驻波叠加而成的行波，以此驱动压紧在导轨上的移动体（滑块）做直线运动。

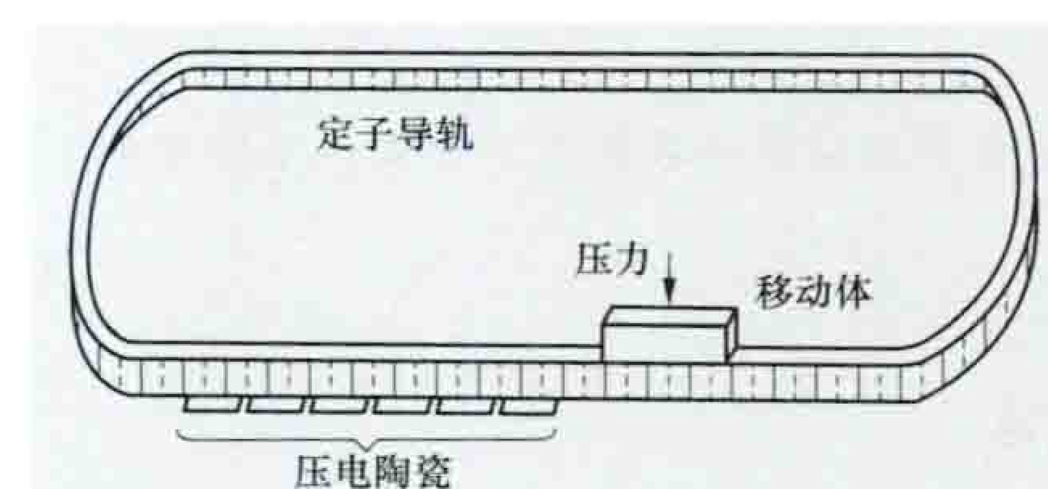


图 2 直线导轨形行波型超声波电动机结构示意图

楔形驻波型超声波电动机　图 3 所示为楔形驻波型超声波电动机结构，它由压电振子、振子前端的楔形振动片和转子三部分组成。它是利用在弹性体内激发的驻波来驱动移动体移动的，但是，单一的驻波并不能传递能量，因为弹性体表面质点做同相振动，因此，通过激发并合成相互垂直的两个驻波，使得弹性体表面质点做椭圆振动，直接或间接地

驱动移动体运动而输出能量。因此，楔形驻波型超声波电动机振子的端面沿长度方向振动，楔形振动片的前端面与转子表面稍微倾斜接触（夹角为 θ），诱发振动片前端产生向上运动的分量，同时产生横向共振，纵横振动合成的结果，使振动片前端质点的运动轨迹近似为椭圆。振动片向上运动时，振动片与转子接触处的摩擦力驱动转子运动；向下运动时，脱离接触，没有运动的传递，转子依靠其惯性保持方向向上的运动状态。这种电动机设计简单，但存在两个缺点：在振动片与转子接触处磨损严重；转子转速较难控制，仅能单方向旋转。

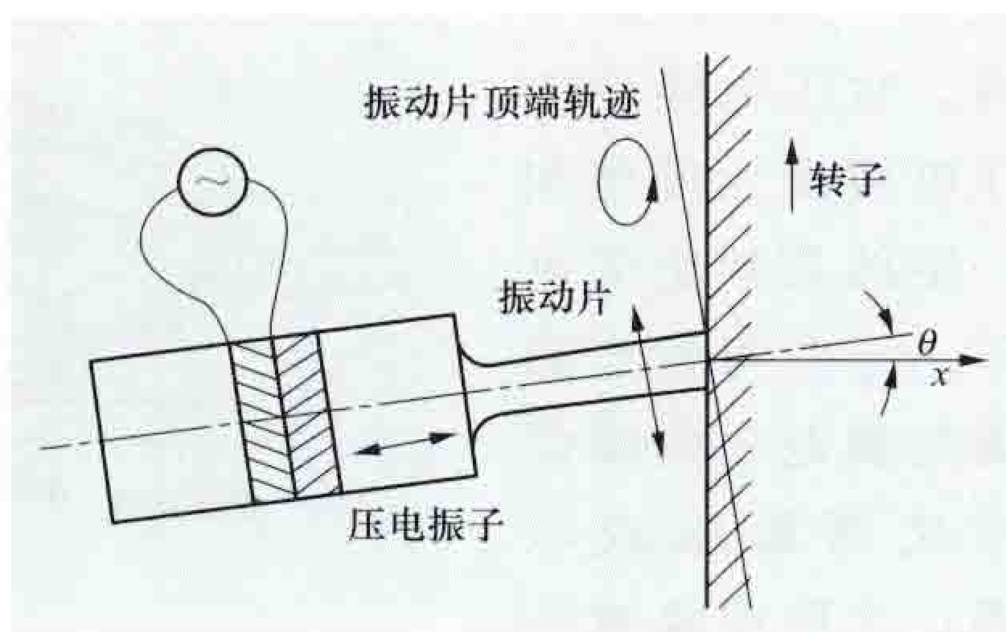


图 3　楔形驻波型超声波电动机结构示意图

多自由度超声波电动机　用得最多的为两自由度超声波电动机，其典型结构如图 4 所示，它由球形转子、两对径向定子等组成。定子是一个短圆柱体，用等截面梁穿过定子来施加轴向力，使得定子与转子紧密接触。利用粘贴在定子上的压电陶瓷同时在定子上激发出两个在空间互相垂直的振动模态，两个模态合成使得定子侧表面产生行波，从而通过摩擦接触驱动球形转子转动。两对径向定子置于一个平面内不同的位置，就可得到两个自由度的运动。

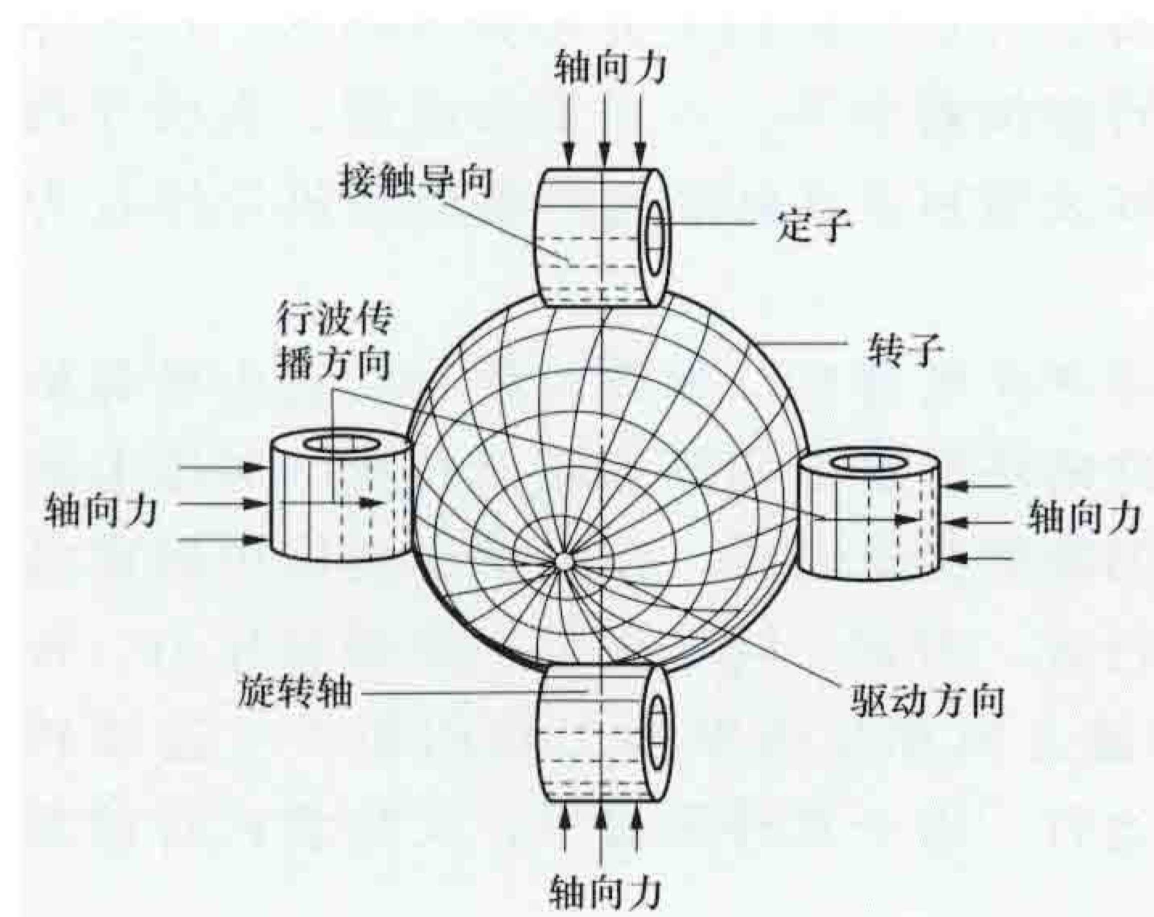


图 4　两自由度超声波电动机结构示意图

参考书目

吴新开．超声波电动机原理与控制．北京：中国电力出版社，2009.

孙建忠，白凤仙．特种电动机及其控制．北京：中国水利水电出版社，2005.

chengshi guidao jiaotong

城市轨道交通　(the city rail transit)　城市内有轨交通的总称。包括地下铁道（见图 1）、轻轨交通、独轨铁路和有轨电车等。

最早发展起来的城市轨道交通是有轨电车。它是在马拉（畜挽）轨道车基础上发展起来的。1886 年美国阿拉巴马州的蒙哥马利市开始出现有轨电车。世界上第一条投入商业运行的有轨电车是在美国弗吉尼亚州的里兹门德市。20 世纪 20 年代是世界有轨电车发展的高潮期。在中国的天津市和大连市也相继出现了有轨电车。1970 年前后，西方国家大量拆除旧式有轨电车为汽车让道，同时着手改造有轨交通，出现了轻轨交通系统。独轨铁路的出现时间也较早，1820 年英国在伦敦码头建成了第一条独轨铁路，1888 年法国人在爱尔兰铺设了 15km 独轨铁路，用于客、货运输。至 20 世纪末全世界共建成 20 余条独轨铁路，其中以日本建设的线路最长。随着城市汽车数量的急剧增加，道路交通堵塞、空气和噪声污染问题日益严重，许多人口密集的大都市逐渐将注意力转移到地下铁道和轻轨交通上来。地下铁道和轻轨交通从系统构成看，并无重大区别，其主要差别在于轴荷重和旅客运送能力上。轻轨交通的轴荷重较小，旅客单向运送人数在（1～3）万人/h之间，而地下铁道的运送能力则在（3～6）万人/h。上海首条轻轨交通明珠线是第一条供电设施实现国产化的城市轨道交通，一期工程于 2000 年 12 月 26 日建成，图 2 为正在架设承力索导线的上海明珠线。

地下铁道　修建于都市地下隧道内的一种高效、大运量全封闭的客运交通系统，简称地铁。地铁在进入郊区时，可在地面或高架桥上运行（见图 3）。地铁列车由动车和拖车编成，每一编组为 6～8 辆。地铁客运量可达（3～6）万人/h，旅行速度约为 45km/h，采用电力牵引。供电方式可以是直流 600、750、825V 或 1500V，架空接触网供电或第三轨供电。北京地铁 1、2 号线（见图 4）和天津地铁 1、2 号线采用直流 750V 第三轨供电，上海地铁、广州地铁则采用直流 1500V 架空接触网供电。图 5 所示为现代化的地铁自动检票设施。



图 1　北京地铁北土城站内景（丛林　摄）



图 2　正在架设承力索导线的上海明珠线


图3 进入郊区的北京地铁（严浩 摄）



图4 北京地铁2号线（严浩 摄）


图5 地铁自动检票设施（丛林 摄）

轻轨交通 简称轻轨（LRT）。轻轨铁路或地铁钢轨采用的钢轨类型基本上都是一样的，差别在于车辆的轴荷重。铁路车辆的轴荷重为22～23t，地铁车辆的轴荷重为16t，而轻轨车辆的轴荷重仅为12～13t。轻轨交通的运送能力比地铁小，比有轨电车和公共汽车大。线路类型有地面、地下和高架3种方式。地下和高架方式为全封闭专用车道，所有交叉路口一律采取立交方式，行人和其他车辆不得进入。地面方式有时也可与地面道路部分混行，但具有现代化管理系统、运输量较大的轻轨系统仍需全封闭运行。轻轨交通的列车编组数较少，一般为4辆，供电方式以架空接触网为主。

独轨铁路 车辆或电动车组在一根导轨上运行的城市轨道交通，主要架设在地面交通拥挤地区。按车辆的运行方式可分为跨座式和悬挂式两大类。跨座式独轨铁路的轨道梁为预应力钢筋混凝土箱形梁，车辆在轨道梁上运行。车辆设有动轮和导轮，动轮以轨道梁为走行面，而导轮则以轨道梁的两个侧面为走行面。动轮承载车体，导轮则用于保持车体稳定和导向。悬挂式独轨铁路的轨道梁由钢柱或钢筋混凝土柱架在空中，车辆悬挂在轨道梁下运行。独轨铁路采用电力牵引，供电方式为直流600、750V或1500V第三轨供电。

有轨电车 由架空导线供给直流电驱动牵引电动机并带动车辆在轨道上行驶的城市轨道交通。通常在街道上行走，列车只有单节，最多亦不过3节。由于电车以电力推动关系，车辆不会排放废气，因而是一种无污染的环保交通工具。

chengshi peidianwang

城市配电网 (urban power distribution network)

向城市及其郊区和县城分配和供应电能的电力网，简称城网。城网的用电负荷密度大，供电质量要求高，是电力系统的重要组成部分，也是所在城市的一项重要基础设施。城市配电网的建设和运行主要包括规划、供电设施的建设、供电质量、配电自动化等。

城市配电网规划 勾画城市配电网发展的蓝图。城市配电网建设和改造要与城市建设和改造紧密配合，同步实施，同时注重与城市环境的相互协调。在中国，应遵照GB 50293《城市电力规划规范》。

编制城市配电网规划的根本目的是指导配电工程项目的建设与改造，既不失时机地配合市政基础设施建设、改造，落实配电项目用地，又能经济合理地拓展配电网络，使配电网能够稳定地满足用电需求，并且保持电网企业自身的可持续发展。

编制城市配电网规划有两个方面的基本任务：①确定宏观规模。主要是论证、提出规划期内负荷增长的趋势和数量；需要新建、改造的一次设备（各级电压变电站和配电网络）工程规模及其综合投资估算；预期的经济、社会效益和可取得的技术经济指标；可能存在的主要风险和降低风险的措施等。②提出实施规划的技术、方针、原则和工程要求。主要是确定适合电网实际的技术原则；明确采用先进、实用的装备及其符合国家节能、环保政策的具体要求；提出合理网架布局、站址、路径（包括地方、地下通道）和配电设施用地等要求，以及无功补偿、二次系统（含继电保护、自动化、通信、信息系统）等建设改造的原则、规模等。

城市供电设施 主要包括变电站、架空配电线路和配电电缆线路。应推广小型化、无油化、高可靠性、免维护或少维护的设备，并应淘汰高耗能设备。

变电站要按照最终规模预选位置、面积和出线走廊或电缆通道；要节约用地，可以与负荷中心建筑群的建筑合建。变电站的设计要充分考虑环境要求，尽量做到与环境协调和谐。在大城市中心区必须建设变电站但用地困难时，可考虑建设地下变电站。为了获得较好的可靠性、灵活性和经济性，一个变电站内的主变压器不宜少于2台和多于4台。

城市架空配电线路规划设计应综合考虑环境要求，与城市绿化相协调。市区中、低压配电线路的导线应选用绝缘导线，主干线导线截面的选择除按电气、机械条件计算外，在同一城网内应力求一致，推行标准化，并留有发展余地。架空配电线路杆塔要适当提高安全系数并积极发展紧凑型杆塔。在主要街道、路间绿地及住宅小区或建筑群中宜推广采用箱式变电站。

电缆线路的规划路径要与城市其他地下管线统一安排，在与市政建设协调的基础上选用安全经济的敷设方式。电缆线路的导线截面应经计算后选定。一个城网的主干线截面力求标准统一，每个电压等级的电缆导线截面宜选用两种规格，预留发展容量。城市的繁华地区、重要地段、主要道路、高层建筑、重点旅游区段以及有市容环境要求和特殊要求地段应采用电缆线路，有条件的地段也应积极推广电缆线路。

供电质量 提供给用户电能的品质。包括供电可靠性和电能质量两个方面。一些国家（如欧盟的国家）把对用户的服务质量也列为供电质量的内容，供电质量始终是城市配电网最重要的要求之一。用户特定电力技术可保证按照用户指定的供电可靠性和电能质量，向用户提供其满意的电力，从而为同一条配电线路上各用户提供各自不同要求的电力。

供电可靠性，即配电系统对用户连续供电的能力。供电可靠性以供电可靠率来表征，可靠性指标是考核现代化城网

的重要内容。供电可靠性与城网结构、设备可靠性、运行水平、检修水平和管理水平、故障修复能力以及自动化水平等有关，因此，供电可靠性是各方面工作的综合反映。在城网规划工作和日常的运行、检修和管理工作中必须充分考虑供电可靠性的目标要求。(见供电可靠性)

电能质量，主要是电压质量。影响电压质量的主要因素是谐波、不平衡电压、电压暂降或升高（包括瞬态和稳态）、闪变等。通常采取的措施有电容器投切、变压器有载分接开关、电压调整装置、滤波装置和静止无功补偿装置等。(见供电质量)

配电自动化　目的是提高供电可靠性，改善电能质量，改善为用户服务的质量，提高管理水平等。配电自动化必须与城网建设和改造配合进行，因此，在编制城网建设改造规划的同时要同步编制配电自动化规划。实施阶段最主要的是建立可靠的配电网架，在此基础上根据技术经济比较确定必需和合适的配电自动化方案。(见配电自动化)

chengshi wugui dianche

城市无轨电车　(city trolley bus)　由架空接触导线供给直流电源，驱动牵引电动机，并带动车辆在道路上行驶的城市公共电车，简称无轨电车。无轨电车（见图）具有加速快、噪声低、无废气污染、舒适性好、操作简便等优点，但受架空接触导线约束，机动性差。



行进中的无轨电车（胡顺增　摄）

简史　无轨电车是由德国人 E.W. 西门子（E.W. Siemens，1816—1892）发明的。1882 年出现在柏林的早期的无轨电车，形似轮式马车，车厢及轮辋均为木结构，采用实心橡胶轮胎和直接控制系统，受流装置由滑轮或滑块及电缆组成，并与两条架空导线相接形成回路，1911 年开始在英国应用。1926 年，中国上海开始有无轨电车。20 世纪 30 年代受能源影响，无轨电车曾在世界上得到广泛应用。40 年代意大利发展了铰接式无轨电车，英国制造了双层无轨电车。50 年代中期世界上约有 500 个城市运用无轨电车，发展达到顶峰。60 年代以后，大型柴油公共汽车的发展，致使无轨电车在城市公共交通系统中的地位逐步下降。70 年代，由于石油危机及汽车废气污染，一些工业发达国家重新研制新型无轨电车，车上加装柴油机或蓄电池作为辅助动力，又称为复合动力无轨电车。它可离开架空导线行驶，其新型的受流装置可以自动控制与架空导线的接通与断开，从而可取消在繁华路口上的架空导线，提高无轨电车的机动性。

结构　无轨电车除动力装置外，还包括底盘、车厢和内部设备（如车门、座位、侧窗以及附属设备等）。无轨电车的集电装置安装在车顶上，通过滑轮或滑块分别与两条架空导线相接，形成回路，输入电能。动力装置一般采用直流串励式或复励式牵引电动机。

原理　无轨电车传统的起动是用接触器分级短路电阻器的方法来限制起动电流，该电阻器与电动机串联连接。这种结构简单的控制装置的主要缺点是起动电阻上的电能损耗较大、效率低、不经济。采用晶闸管斩波直流调速控制，电动机的起动性能有了很大的提高，并且可以通过电感作用实现机车的再生制动。中国的无轨电车已经推广采用斩波技术调压控制。芬兰的无轨电车采用了交流电动机驱动，同时利用斩波器控制牵引和再生制动，可节能 21%～27%。交流电动机与直流电动机相比，具有坚固、结构简单、质量轻、效率高、价格便宜和维修简便等优点。

chengshi zhaoming

城市照明　(urban lighting)　城市功能照明与景观照明的总称。城市功能照明是为保障城市夜间活动安全与信息获取所提供的包括道路、室外作业场地以及广告与标志照明等；景观照明则是为获得良好的夜间视觉感受，对城市景观元素所施加的装饰性照明，主要包括自然地景、水景、建（构）筑物、广场、人行道、园林绿地、风景名胜以及相关公共设施的装饰性照明等。城市照明是城市公共设施的组成部分，其质量和水平是反映社会进步和现代化程度的标志之一。北京、上海、广州城市照明见图 1～图 3。



图 1　北京天安门城楼夜景



图 2　上海外滩夜景

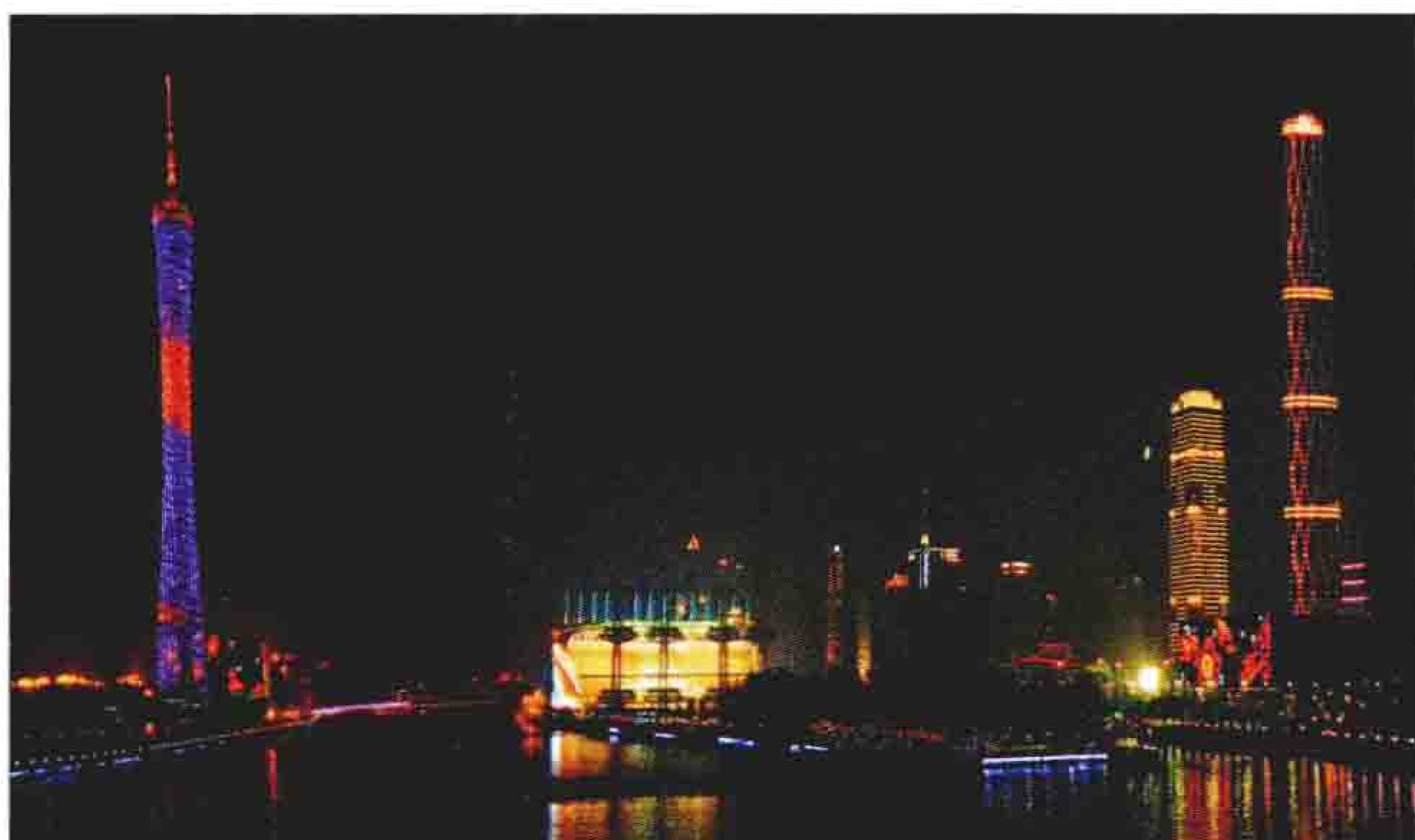


图 3 广州电视新塔、海心沙和西塔夜景

城市照明规划应遵循本城市总体规划确定的城市定位与发展目标，全面深入调查本城市自然地理环境、历史人文资源、城市建筑现状，结合城市经济水平与社会发展趋势，确定城市照明的总体目标和原则，并与城市电力规划、能源规划、综合交通规划、绿地系统规划、历史文化名城保护规划、旅馆规划、商业规划、景观规划以及其他相关规划相互协调，远近结合，指导城市照明建设，使城市功能照明与景观照明协调发展。

见绿色照明。

chongji fuhe

冲击负荷 (impact load) 运行中的用电设备突然短时间从电力系统取用的很大的功率。一般冲击负荷出现的时间很短，但其峰值可能是其平均值的数倍甚至数十倍，引起电力系统的频率波动、公共供电节点的电压暂降、灯光闪烁、电视机图像畸变，有时电压暂降还会影响电网自动装置的正常工作。其中周期性冲击负荷还会造成闪变。（见电压波动和闪变）

引起冲击负荷的常见用电设备有炼钢电弧炉、电力机车、压延机、大型化工生产设备、轨道交通交流感应电动机、电焊机等，冲击负荷出现于炼钢电弧熔化期、电力机车爬坡期间、压延机在坯料送入轧辊期间、电焊机引弧期间、地铁等轨道交通设备起动期间等。由于主要产生冲击负荷的用电设备大多用电功率因数较低，因此冲击负荷对无功功率的影响尤为严重。

消除冲击负荷对电力系统影响的主要措施有加大电力系统短路容量，采用快速调节的动态无功补偿装置、采用感应电动机的软式起动（如变频起动或可变功率因数起动）等，对产生冲击负荷的用电设备提高供电电压等级、采取专线供电等。

chongfu jiedi

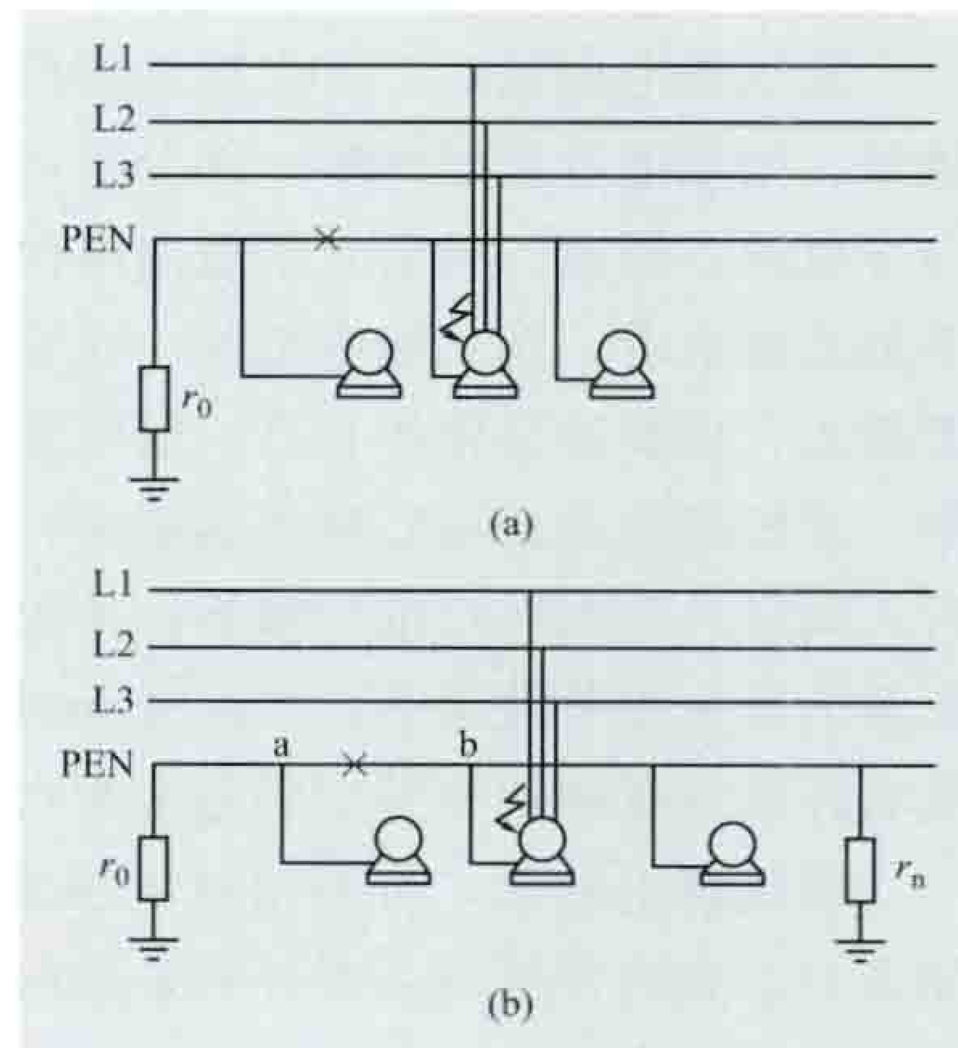
重复接地 (iterative earthing)

中性线和保护线的公用线（PEN 线）或保护线（PE 线）每隔一定距离的接地。重复接地可以降低 PE 线或 PEN 线断线时或电气设备短路时电气设备的对地电压，从而减少触电危险。重复接地还有减小中性点偏移而引起的三相电压不平衡的作用。图（a）为无重复接地的低压配电系统示意图。图中 PEN 线（或 PE 线）断线且断线点后的某一电气设备绝缘损坏，致使其外露可导电部分带电时，接于断线点后、与 PEN 线（或 PE 线）连接的所有电气设备的外露可导电部分都会发生对地电压的升高，其值近似为相电压 U_{ph}。当该配电系统进行重复接地后［见图（b）］，PEN 线（或 PE 线）的断线点前后电气设备外壳上的对地电压分别为

$$U_a=\frac{U_{ph}}{r_0+r_n}r_0,\quad U_b=\frac{U_{ph}}{r_0+r_n}r_n$$

设 $r_0=r_n$，则 $U_a=U_b=\frac{1}{2}U_{ph}$，即所有电气设备外壳上的对地电压由 U_{ph} 降至 $\frac{1}{2}U_{ph}$。可见重复接地可以在故障时降低电气设备的对地电压。

中国国家标准规定，重复接地的接地电阻应小于 10Ω。国际电工委员会（IEC）标准中则推荐等电位接地，即如有其他有效接地体时，保护线应合理地、尽可能地与这些接地体相连接，以形成与地电位接近的等电位。



低压配电系统示意图

(a) 无重复接地；(b) 有重复接地

在低压三相四线制中性点直接接地系统中，将配电线路的零干线和各分支线的终端接地，零干线上每隔 1km 做一次接地，对于距接地点超过 50m 的配电线路、接入用户处的零线应重复接地。

在 TN-S（三相五线制）系统（见低压配电网接地方式）中，零线（即中性线）不允许重复接地。如果中性线重复接地，剩余电流动作保护检测就不准确，不能起到有效的保护作用。

chuyu laji chuliqi

厨余垃圾处理器 (kitchen waste processor) 一种将家庭厨房厨余垃圾进行处理的家用电器。厨余垃圾处理器由壳体、电动机、搅碎工作头等组成，其外观见图 1。如图 2 所示，厨余垃圾处理器通常安装在水槽下方，与水槽下水口连接。厨余垃圾倒在水槽中，用水冲入处理器中。厨余垃圾处理器通过电动机带动的搅碎刀具将厨余垃圾搅碎。处理方式有两种：①将搅碎的厨余垃圾与水混合成糊状，进入下水道排出。其缺点是可能会增加下水道的堵塞几率，也增加



图 1 厨余垃圾处理器



图 2 厨余垃圾处理器内部结构

了污水的黏度和稠度，不利于污水的处理。②将搅碎的厨余垃圾与水分离，形成干燥的垃圾糟粕。该方案比较环保，与水分离的垃圾糟粕不随水流冲走，可取出，作为有机肥料的原料。

chudian jijiu

触电急救 (shock first-aid measures) 对发生触电事故者进行的抢救。人体触电后，会遭受严重的病理损害，触电时间越长，危险性越大。当通过人体的电流达100mA以上时，立即可使心脏停止跳动和呼吸停止，触电者呈现昏迷不醒的“假死状态”，必须进行迅速而正确的抢救。抢救效果随丧失抢救时间的延长而迅速下降。抢救开始时间小于1min，复苏效果达60%；若抢救开始时间大于12min，复苏的效果就很小。

发生触电事故后，首先应立即使触电者脱离电源，越快越好。把触电者接触的那一部分带电设备断开，或将触电者与带电设备脱离。触电者未脱离电源，救护人员不准直接用手触及触电者，防止触电危险。在脱离电源中，救护人员既要救人，也要注意保护自己。触电者脱离电源后必须分秒必争，立即就地迅速用心肺复苏法进行抢救，并坚持不断地进行，同时及早与医疗部门联系，争取医务人员接替救治。在医务人员未接替救治前，不应放弃现场抢救，更不能只根据没有呼吸或脉搏擅自判定触电者死亡，放弃救治。

现场触电抢救，对采用肾上腺素等药物应持慎重态度。如没有必要的诊断设备条件和足够的把握，不得乱用。在医院内抢救触电者时，由医务人员经医疗仪器设备诊断，根据诊断结果决定是否采用。

脱离电源　若触电者触及低压带电设备，救护人员应设法迅速切断电源，如拉开电源开关或刀闸，拔除电源插头等；或使用绝缘工具，干燥的木棒、木板、绳索等不导电的东西使触电者脱离带电设备；也可抓住触电者干燥而不贴身的衣服，将其拖开，切记要避免碰到金属物体和触电者身体的裸露部分；还可戴绝缘手套或将手用干燥衣物等包起绝缘后将触电者拖开；救护人员可站在绝缘垫上或干木板上进行救护。

为使触电者与导电体脱离，最好用一只手进行。如果电流通过触电者入地，并且触电者紧握电线，可设法用干木板塞到触电者身下，使其与地隔离，也可用干木把斧子或有绝缘柄的钳子等将电线剪断。剪断电线要分相一根一根地剪断，并尽可能站在绝缘物体或干木板上。

若触电者触及高压带电设备，救护人员应迅速切断电源，或用适合该电压等级的绝缘工具（戴绝缘手套、穿绝缘靴并用绝缘棒）使触电者脱离。救护人员在抢救过程中应注意保持自身与周围带电部分必要的安全距离。

如果触电发生在架空线杆塔上，如系低压带电线路，若可能立即切断线路电源，应迅速切断电源，或者由救护人员迅速登杆，束好自己的安全带后，用带绝缘胶柄的钢丝钳、干燥的不导电物体或绝缘物体将触电者拉离电源；如系高压带电线路，又不可能迅速切断电源开关，可采用抛挂足够截面的适当长度的金属短路线的方法，使电源开关跳闸。抛挂前，将短路线一端固定在铁塔或接地引下线上，另一端系重物，抛掷短路线时应注意防止电弧伤人或断线危及人员安全。不论是哪一级电压线路上触电，救护人员在使触电者脱离电源时要注意防止发生高处坠落和再次触及其他有电线路。

如果触电者触及断落在地上的带电高压导线，且尚未确实证明线路无电，救护人员在做好安全措施（如穿绝缘靴或临时双脚并紧跳跃地接近触电者）前，不能接近断线点8～10m范围内，防止跨步电压伤人。触电者脱离带电导线后亦应迅速带至8～10m以外后立即开始触电急救。只有在确实证明线路已经无电，才可在触电者离开触电导线后，立即就地进行急救。

脱离电源后的处理　触电者如神志清醒，应使其就地躺平，严密观察，暂时不要站立或走动。

触电者如神志不清，应就地仰面躺平，且确保气道通畅，并用5s时间，呼叫触电者或轻拍其肩部，以判定触电者的意识是否丧失。禁止摇动触电者头部呼叫触电者。

触电者呼吸和心跳停止时，应立即按心肺复苏法（即通畅气道、口对口或口对鼻人工呼吸、胸外按压）正确进行就地抢救，并设法联系医疗部门接替救治，见图1。



图1　人工呼吸示意图

(a) 看、听、试伤员呼吸；(b) 口对口吹气；(c) 正确按压姿势

抢救过程中触电者的移动与转院　包括就地抢救、移送医院和创造条件等方面。

(1) 触电者脱离电源后，应立即在现场就地坚持进行心肺复苏，不要为方便而随意移动触电者，如确需移动，抢救中断时间不应超过30s。

(2) 移动触电者或将触电者送医院时，应使触电者平躺在担架上并在其背部垫以平硬阔木材（见图2），移动或送医院过程中还应继续抢救，心跳呼吸停止者要继续心肺复苏法抢救，在医务人员未接替时救治不能中止。

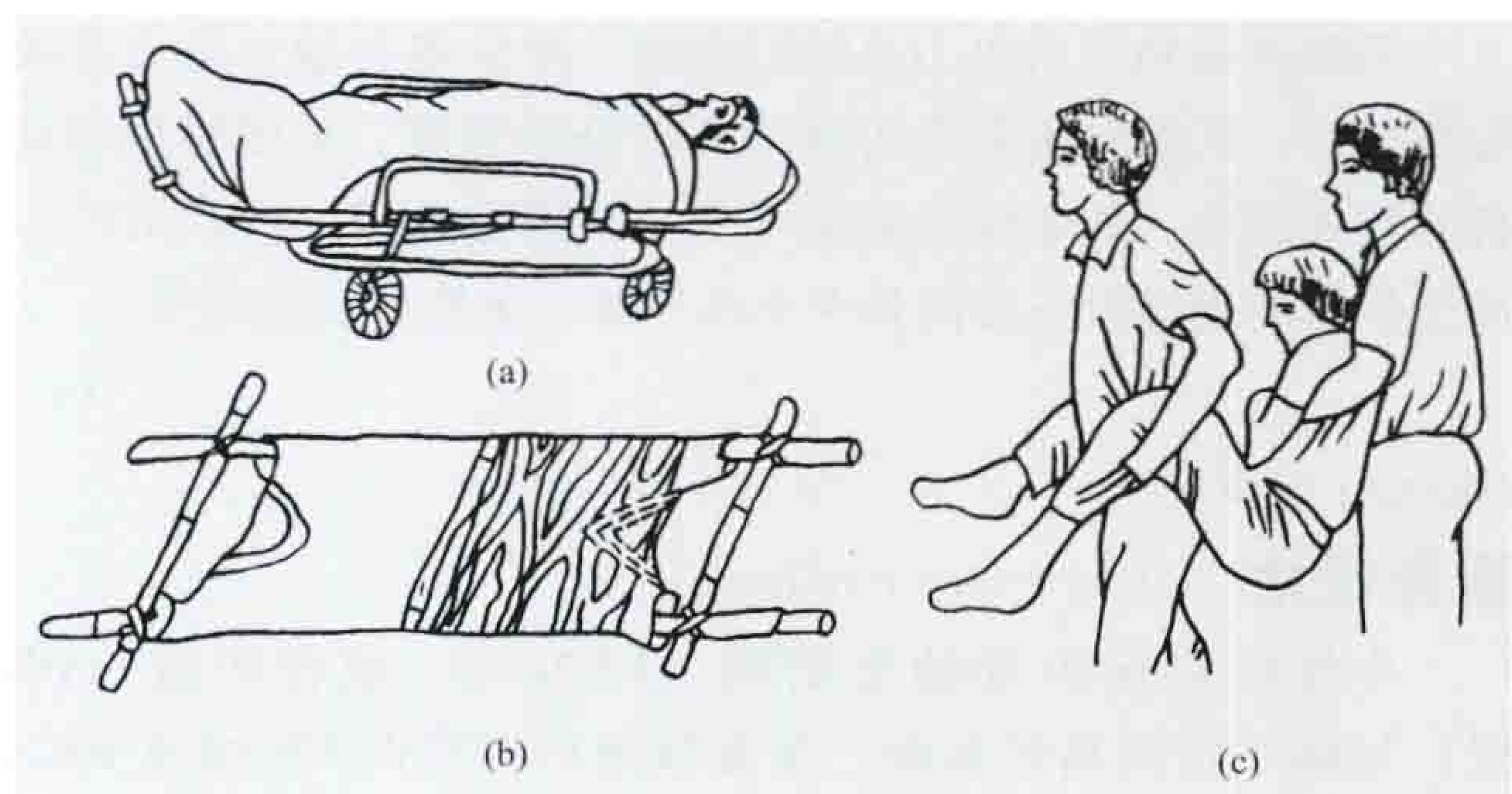


图2　搬运触电者示意图

(a) 正常担架；(b) 临时担架或木板；(c) 错误搬运

(3) 创造条件，用塑料袋装入砸碎的冰屑，做成帽状包绕在触电者头部，露出眼睛，使其脑部温度降低，争取心肺

脑完全复苏。

触电者好转后的处理　如触电者的心跳和呼吸经抢救后均已恢复，可暂停心肺复苏法操作。但心跳呼吸恢复的早期有可能再次骤停，应严密监护，不能麻痹大意，要随时准备再次抢救。初期恢复后，触电者神志不清或精神恍惚、躁动时，应设法使其安静。

cifu tielu

磁浮铁路　(transrapid)　利用电磁感应原理，以直线电动机驱动车辆，运行时车体悬浮或吸浮于导轨上面，并与之保持一定间隙的铁路。磁浮铁路所用的车辆通常称为磁浮列车。磁浮列车悬浮或吸浮于铁路导轨上，无轮轨摩擦，不受黏着条件限制，具有高速（时速可达500km/h以上），无公害（无环境污染），轮轨间无冲击振动，安全稳定，舒适性好，检修量小，没有钢轨、车轮、接触线、受流器等的磨损，可完全自动控制等特点。

按磁浮车辆所用的电磁铁可分为常导吸引型（EMS）及超导排斥型（EDS）两大类。磁浮铁路的导轨结构有反T型及U型两种（见图1），一般采用钢筋混凝土制成，其上铺设有导轨及悬浮、导向用线圈等。

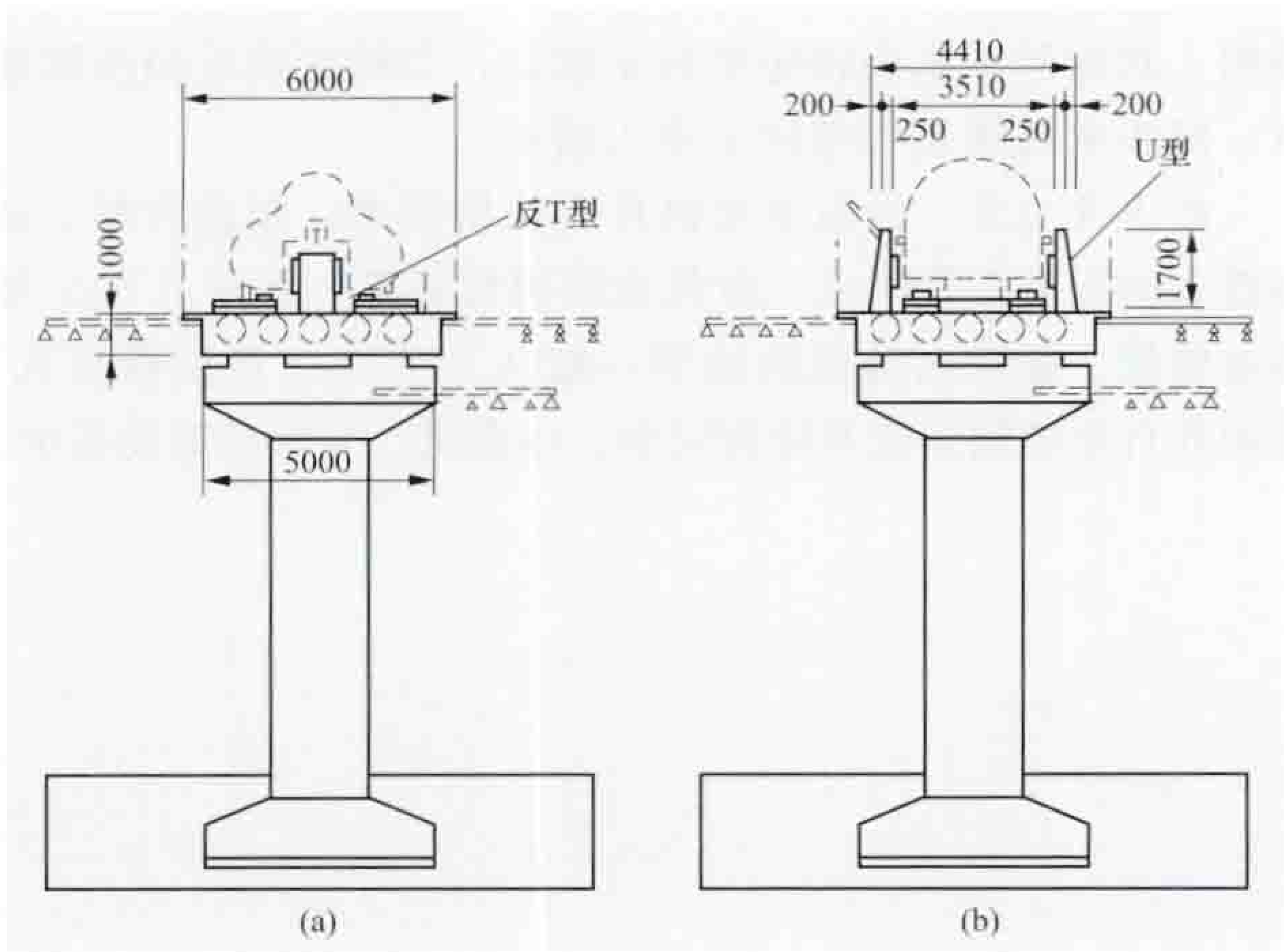


图1　磁浮铁路导轨结构（单位：mm）
(a) 反T型导轨结构；(b) U型导轨结构

常导吸引型磁浮铁路　利用电磁铁吸钢板的原理运行，见图2(a)。这类磁浮铁路在磁浮列车车体底部安装电磁铁1，两侧倒转向上的顶部安装电磁铁2，在T型导轨的上方和伸臂部分下方分别装设反作用板和感应钢板。当电磁铁2通电后，对感应钢板的吸引力与车辆重力平衡时，车辆悬浮于导轨面上；当电流通过电磁铁1时，反作用板产生涡流，利用两者的拉力使车辆前进。运行的车辆用直线异步电动机驱动。这种类型磁浮铁路适用于高速干线或中、低速的城市及近郊运输，成本较低。中国上海龙阳路—浦东机场磁浮线路属于常导吸引型磁浮铁路。

超导排斥型磁浮铁路　利用磁铁同极相斥原理运行，见图2(b)。这类磁浮铁路在磁浮列车的车体上安装有超导磁铁，轨道侧安装有悬浮线圈、推进兼导向线圈。当直线电动机推动车辆运行时，超导线圈内通电后成为超导磁铁，由于磁感应作用，使悬浮线圈及左右的导向线圈内交链磁通变化，因而产生浮力或左右导向的复原力，维持磁浮车辆正常

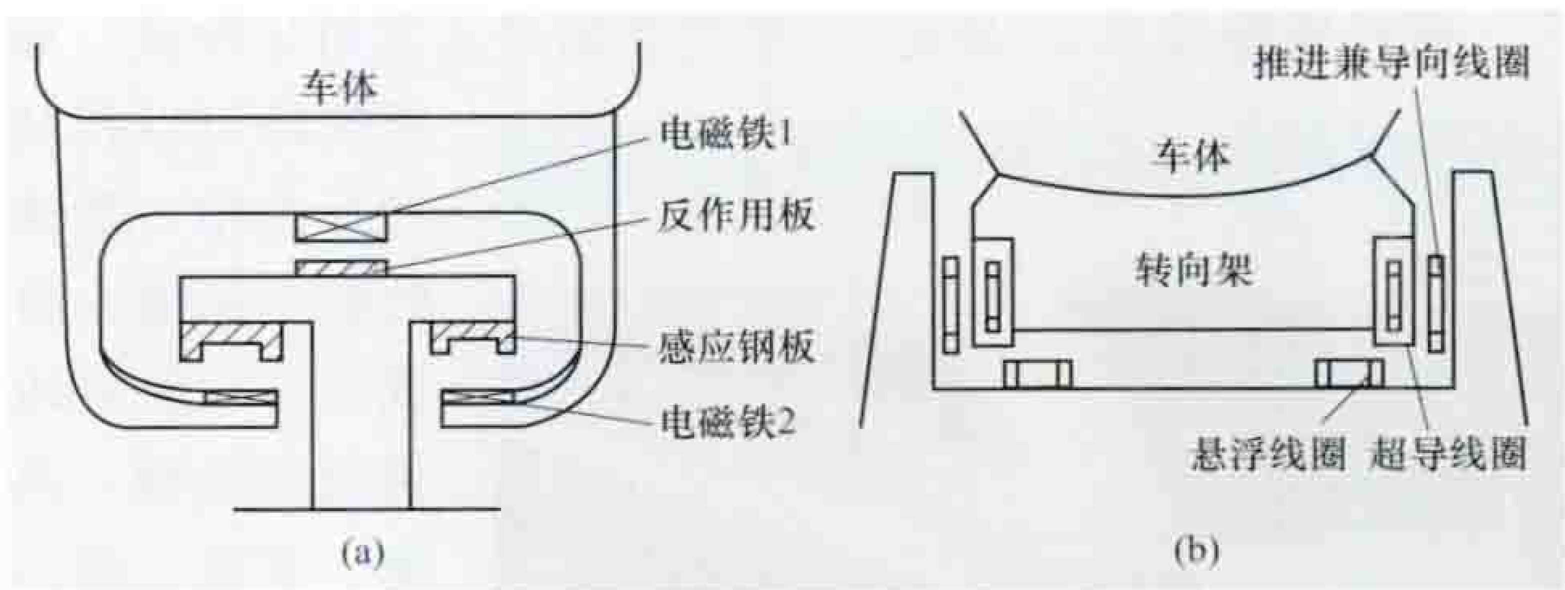


图2　磁浮列车原理图
(a) 常导吸引型；(b) 超导排斥型

悬浮运行。超导排斥型磁浮铁路的磁浮列车采用直线同步电动机驱动。这种铁路悬浮高度达100mm，能高速运行，在日本宫崎实验线上的MLU型磁浮试验车辆属于此型，且只有日本用此类型磁浮铁路。

简史　日本自20世纪60年代开始研究常导吸引型磁浮铁路。由于超导和电子技术的迅速发展，从1970年开始研试超导排斥型磁浮铁路，在7km长的宫崎实验线上进行了一系列基础技术研究试验工作，1977年开始运行试验，1987年运行速度达400km/h。1992年开工修建42km长的山梨新实验线，用于进行实用化的考核试验。

联邦德国在20世纪60年代末开始研制高速磁浮列车，1977年经过试验分析，决定采用常导吸引型磁浮铁路。1979年在汉堡国际博览会上用TR-05型动车创造了试验速度为90km/h的纪录。1983年以TR-06型动车创造了最高试验速度达402.6km/h的纪录。该车是按实用运行设计的，最多编组为12辆。TR-07型快速动车在防止噪声、减轻质量、提高速度等方面又做了改进，1989年12月在埃姆斯兰试验基地创造最高速度435km/h。德国在汉堡—汉诺威间（150km）修建的磁浮铁路，已部分投入运营。世界磁浮铁路及磁浮列车见图3。



图3　世界磁浮铁路及磁浮列车（袁维慈　提供）

上海龙阳路—浦东机场磁浮铁路（见图4）是世界上第一条投入商业化运营的磁浮列车示范线，于2002年12月31日启用。磁浮示范运营线西起上海轨道交通2号线龙阳路站，东到上海浦东国际机场站，线路正线全长32.3km，设计最高运行速度为430km/h，单线运行时间约8min。

磁浮铁路技术 20 世纪 90 年代开始进入实用化阶段。磁浮铁路可以代替和补充中、低速的航空运输，将成为 21 世纪改善交通运输，高速、节能、低污染，有利于生态及环境保护的比较理想的交通工具，在未来的信息化发展的综合交通运输系统中将占有重要地位。

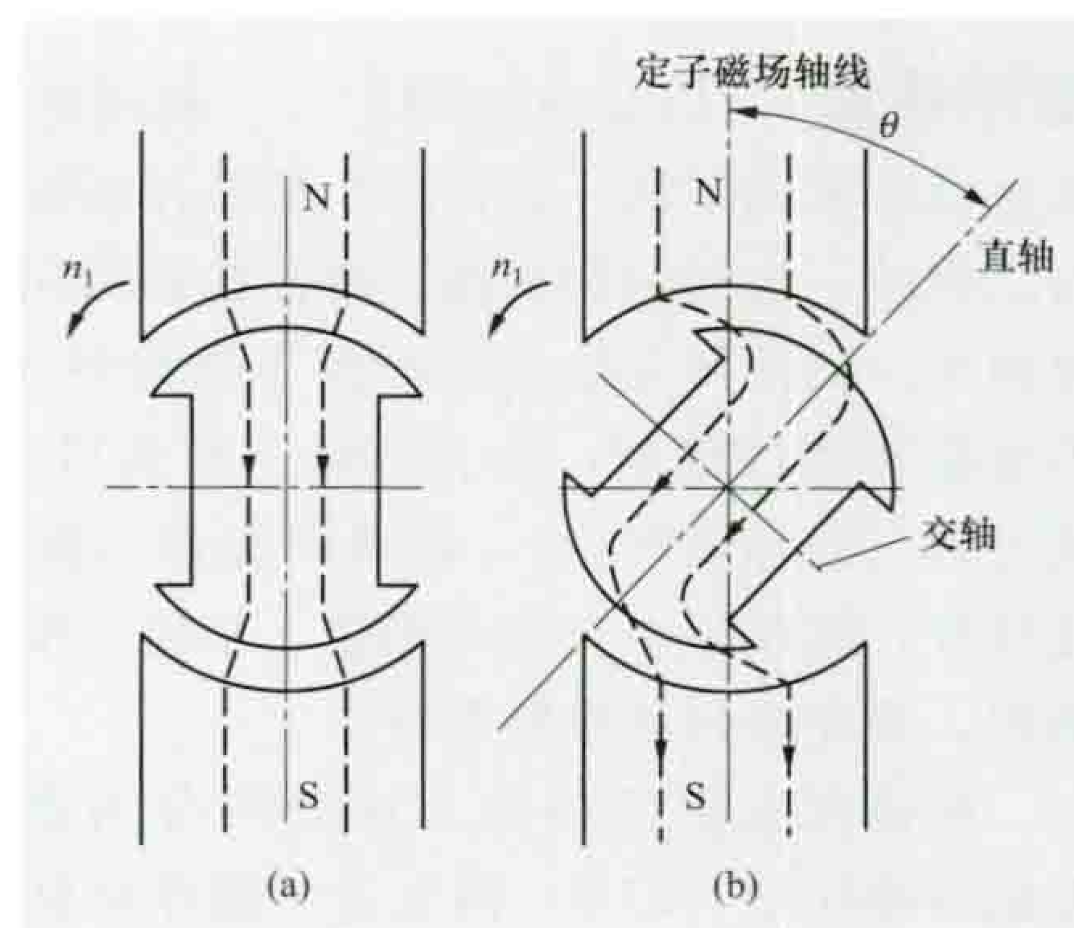


图 4　上海龙阳路—浦东机场磁浮列车

cizu diandongji

磁阻电动机　(reluctance motor)　转子无励磁，具有若干形状规则的凸出部分，上面装有起动用的笼型绕组或不装笼型绕组的一种同步电动机，又称反应式同步电动机。磁阻电动机相当于没有励磁绕组的凸极同步电动机，利用转子磁路交、直轴磁阻的不对称而产生电磁转矩。

工作原理　如图所示，磁阻电动机的定子绕组接上电源产生旋转磁场，由于转子直轴磁路磁阻小于交轴磁路磁阻，而磁力线总是通过磁阻小的路径闭合，因此，定子磁场总是力图使转子直轴顺着定子磁场的方向。当转子与定子磁场都以同步转速 n_1 旋转时，如果转轴上没有负载，则转子直轴始终与定子磁场轴线一致，如图 (a) 所示。如果转轴上带有负载，则负载的阻转矩会使转子直轴滞后定子磁场轴线一个角度 θ，如图 (b) 所示。这时磁场被扭歪，磁力线被拉长。被拉长的磁力线力图缩短，就会产生一个方向与转子旋转方向相同的同步电磁转矩。如果同步电磁转矩能够与负载转矩相平衡，转子将仍然按同步转速旋转，否则，电动机就会失去同步。为了提高同步电磁转矩和功率因数，应增大直轴、交轴磁阻间的差别，即提高直轴同步电抗 X_d 与交轴同步电抗 X_q 的比值 X_d/X_q。为此，转子可以是凸极结构，也可以是在转子内开设反应槽（通常填入非磁性金属）以造成交、直轴磁路磁阻不相等的隐极结构，还可以是两者的结合。X_d/X_q 不可太大，太大时，电动机起动将较困难。

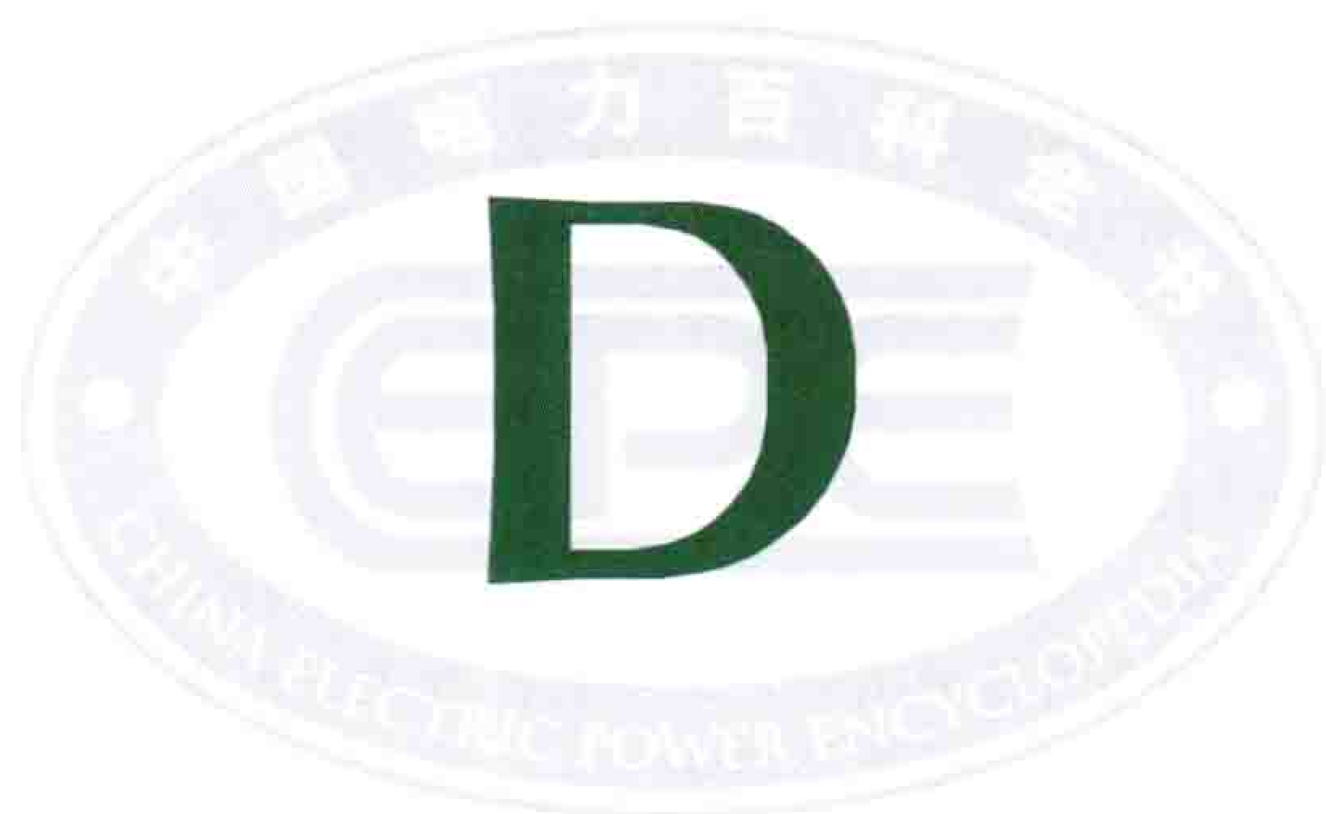


磁阻电动机工作原理示意图

(a) 无负载时；(b) 有负载时

磁阻电动机的同步电磁转矩不能使电动机起动，因此电动机转子上要装设笼型绕组，利用异步电磁转矩使转子起动，当转速接近同步转速时，同步电磁转矩可把转子牵入同步。

特点及应用　磁阻电动机具有结构简单、制造容易、成本低和运行可靠等优点，但其功率因数较低（小于 0.5），效率也较低。磁阻电动机的功率一般从几分之一瓦到数百瓦，常用在自动控制装置及物理仪表、电影机、复印机等设备中。



danwei chanpin (chanzhi) haodian

单位产品（产值）耗电 [electricity consumption per unit product (unit output value)] 生产单位产品或完成单位工作量（产值）所消耗的电能量，又称产品（产值）单耗。产品（产值）单耗通常按一个生产（工作）周期内产品产量（产值）和消耗电能量进行加权平均计算，即

$$D=\frac{W}{G}$$

式中 D 为产品（产值）单耗；W 为一个周期生产产品（产值）消耗的电能量；G 为一个周期内生产合格产品（产值）的数量。

产品（产值）单耗是制定电耗定额的参考因素之一。它与核定的电耗定额比较，可用于考核合理用电、生产人员工作水平和计算节约用电成果；与本单位历史产品（产值）单耗对比可用于检查节约用电工作成果；与同类企业产品（产值）单耗对比，可检查生产技术水平和经营管理水平的差异。

为了达到可比的目的，计算产品（产值）单耗采用的产品产量（产值）以及消耗电能量的计算范围、单位，统一按制定电耗定额的规定进行计算。

danxiang ganying diandongji

单相感应电动机 (single-phase induction motor) 用单相交流电源供电的感应电动机，亦称单相异步电动机。单相感应电动机与同容量的三相感应电动机相比，体积较大，起动和运行性能较差，但如果容量不大，则所述缺点不很突出，因此只做成小容量的，功率从几瓦到几千瓦。单相感应电动机由于具有结构简单、成本低廉、运行可靠等优点，广泛应用于家庭、办公室、医院和商店等只有单相交流电源的场所，以及各行各业的小功率驱动中。

基本工作原理 如果定子上只有一相绕组，在绕组中通入交流电流，将产生脉振磁通势，它的幅值位置不随时间改变，但幅值的大小随时间变化。一个脉振磁通势可以分解为两个幅值相等、朝相反方向旋转的旋转磁通势 $\underline{F}_+$ 和 $\underline{F}_-$，每个旋转磁通势的幅值为脉振磁通势最大幅值的一半，旋转角速度均为同步角速度。这两个旋转磁通势分别产生正转磁场和反转磁场，正、反转磁场同时在转子绕组中分别产生感应电动势和电流，从而产生使电动机正转和反转的电磁转矩 T_+ 和 T_-，$T_+=f(n)$ 和 $T_-=f(n)$ 曲线如图 1 所示。图中 $T_+=f(n)$ 的同步转速为 n_1。当转子转速 n 处于 n_1 和 0 之间时，为电动机状态，产生的电磁转矩作为正方向。当转子转速 n 为负值时，为制动状态。$T_-=f(n)$ 的同步转速为 $-n_1$。当转子转速处于 $-n_1$ 和 0 之间时，为电动机状态，产生的电磁转矩为反方向。当转子转速 n 为正值时，为制动状态。由于 $F_+=F_-$，曲线 $T_+=f(n)$ 和 $T_-=f(n)$ 是对称的，总的电磁转矩 $T=T_++T_-$，$T=f(n)$ 为合成机械特性。从图 1 所示 $T=f(n)$ 曲线可看出，单相感应电动机有两个特性：①$n=0$ 时，由于 $T_+=-T_-$，使合成电磁转矩 $T=0$。这说明电动机只有一相绕组时，不能产生起动转矩。②若采取措施使电动机具有一定转速，即 $n\neq0$，合成转矩 $T\neq0$，转速为正时 T 亦为正，转速为负时 T 亦为负。这说明单相感应电动机虽无起动转矩，但一经起动，电动机只有一相绕组也能继续运行。

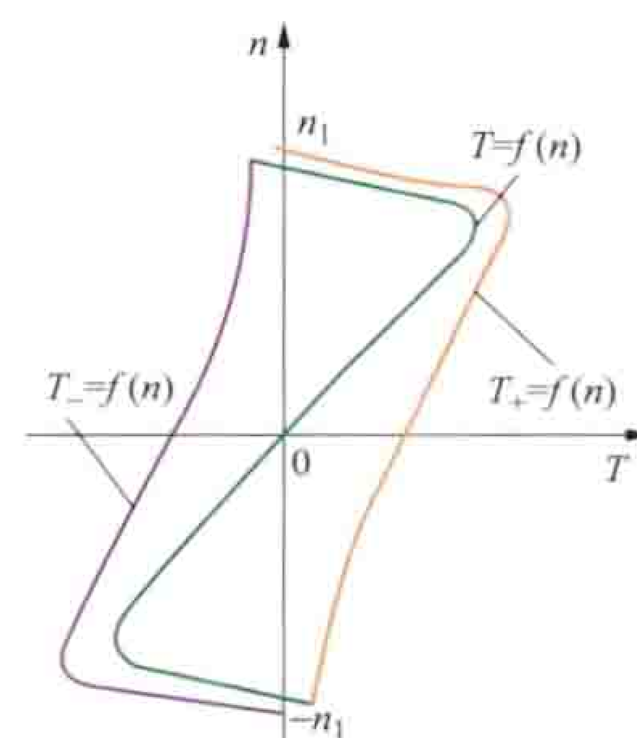


图 1 单相感应电动机转矩-转速特性

如果在定子上有空间不同相位的两相绕组，并通以时间不同相位的两相交流电流，则可产生旋转磁通势。若两相绕组的轴线在空间上相差 90°电角度（电角度等于机械角度乘以电动机磁极对数），两相电流在时间上相差 90°电角度，两相的磁通势大小相等，则在电动机内产生圆形旋转磁通势。若两相绕组不满足上述要求中的任何一个时，将产生椭圆磁通势，它可分解为两个大小不等、朝相反方向旋转的旋转磁通势 $\underline{F}_+$ 和 $\underline{F}_-$，$\underline{F}_+$ 和 $\underline{F}_-$ 将在电动机内分别产生电磁转矩 T_+ 和 T_-。$T_+=f(n)$、$T_-=f(n)$ 和 $T=f(n)$ 曲线如图 2 所示。由于 $F_+\neq F_-$，$T_+=f(n)$ 的最大值和 $T_-=f(n)$ 的最大值不相等，故两条曲线不对称。从 $T=f(n)$ 曲线可以看到，$n=0$ 时，起动转矩 $T_{st}\neq0$。起动转矩的大小与正、反转磁通势的大小有关，F_+ 和 F_- 相差越大，则起动转矩越大。起动转矩的方向与 T_+ 和 T_- 中较大的同向。

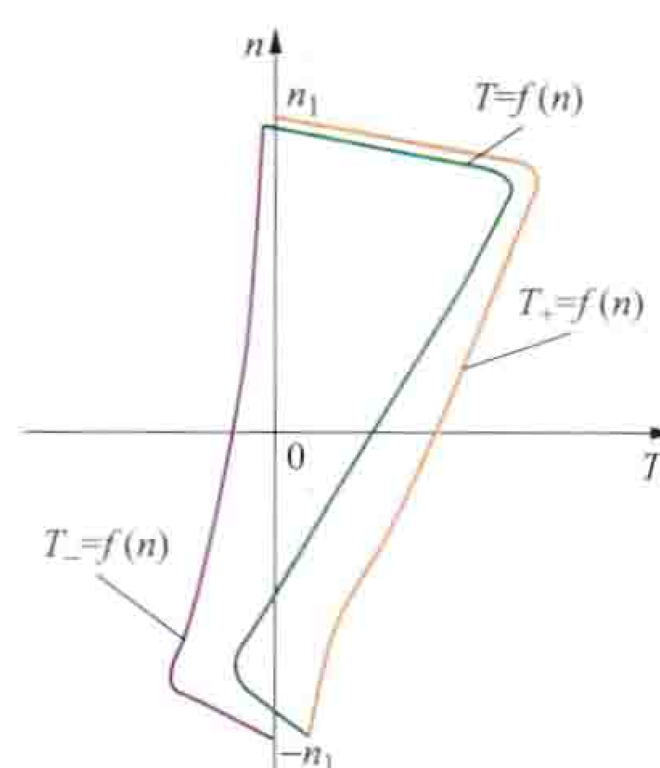


图 2 两相感应电动机转矩-转速特性

由单相感应电动机的转矩-转速特性可知，单相感应电动机起动必须具备两个条件：①在定子上有两个空间不同相位的绕组，一个是主绕组（也叫工作绕组或运行绕组），另一个是辅助绕组（也叫起动绕组）；②两相绕组中通入不同时间相位的交流电流。因此，实际的单相感应电动机在起动时都是一个两相绕组的电动机。主绕组在电动机起动和运行时都一直接在交流电源上，而辅助绕组只在起动时通电，起动后可以切除不用。

分类 根据起动方法和相应结构上的不同，单相感应电动机有分相式和罩极式两种。

分相感应电动机 其定子上有两个在空间相差 90°电角度的绕组。一个是主绕组，由单相电源供电；另一个是辅助绕组，串联电阻或电容后与主绕组并联，以使其中通过的电流与主绕组中的电流有一定的时间相位差。这样两个绕组在

电动机中就可产生椭圆磁通势，甚至可能接近圆形磁通势，电动机可以获得起动转矩。改变辅助绕组回路（指辅助绕组和电阻或电容串联的回路）的电阻或电容，使两相绕组中电流的相位差不同，则椭圆磁通势的椭圆度随之不同，电动机的性能也就有所差异。分相感应电动机又可分为电阻起动分相感应电动机、电容起动分相感应电动机、电容起动及运行分相感应电动机和双值电容分相感应电动机。

罩极感应电动机　具有与主绕组在空间上相差一个电角度的辅助性短路绕组。主绕组和短路绕组都在定子上。这种电动机的转子都是笼型结构，定子有凸极式和隐极式两种。凸极式定子铁芯由硅钢片叠压而成，每极上装有集中绕组，即主绕组，每极极靴的一边约1/3处开有小槽，小槽中嵌入短路铜环，叫短路绕组。短路绕组把部分磁极罩起来，故有罩极感应电动机之称。图3所示为系列单相罩极式电动机。

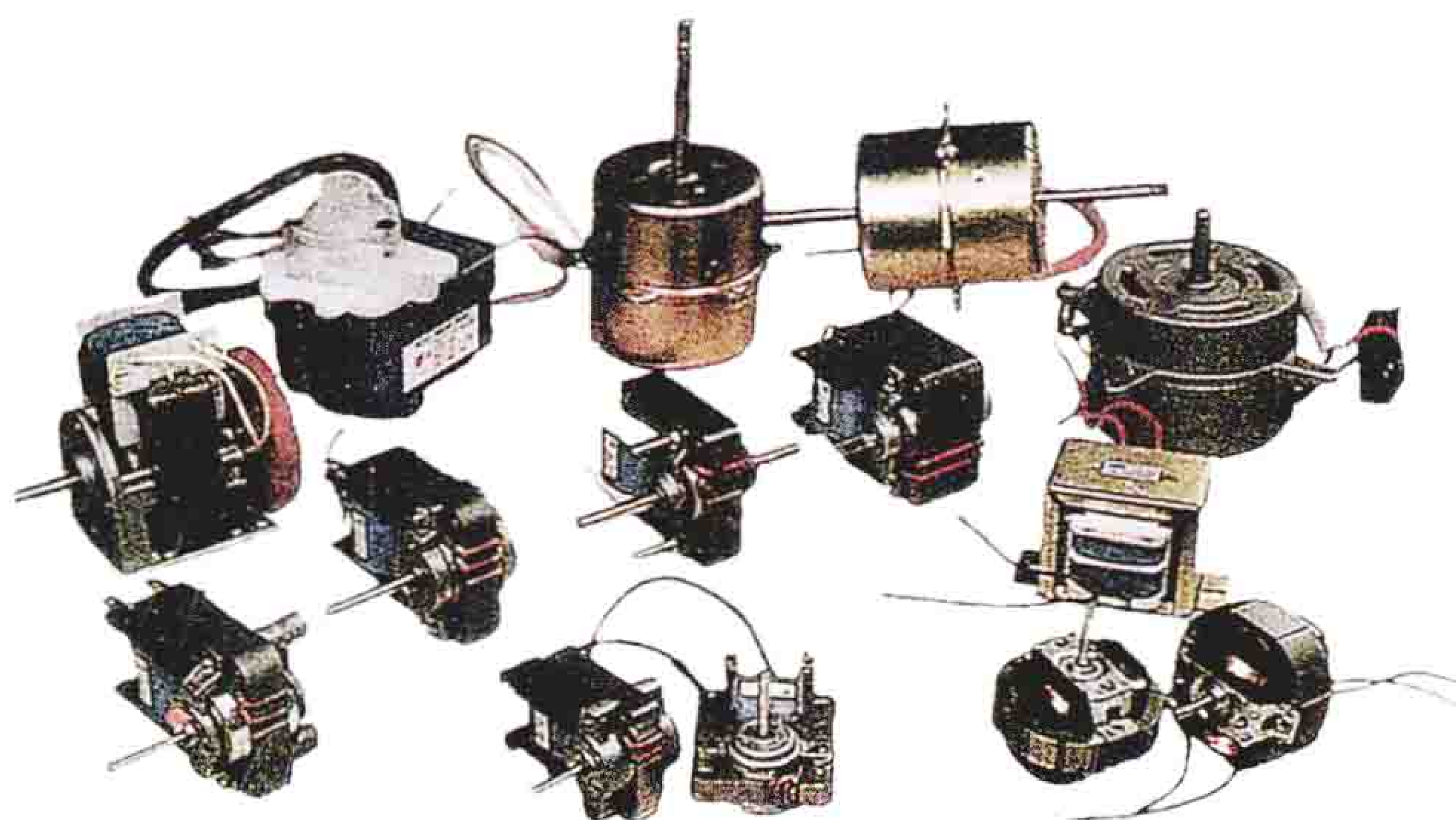


图3　单相罩极式电动机

daokaiguan

刀开关　(knife switch)　带有刀形动触头，在闭合位置与底座上的静触头相楔合的配电电器（见低压电器），也称闸刀开关。刀开关主要用于电路中隔离电源或不频繁地接通和分断额定电流以下的负荷。专作隔离电源用的刀开关，也称隔离开关。它处于断开位置时可明显地看出间隙，以确保操作和检修人员的安全。

刀开关通常由绝缘底座、刀形动触头（又称动触刀）、静触头、灭弧装置和操动机构组成。只作隔离电源用的刀开关不需要灭弧装置。用于电解、电镀等设备中的大电流刀开关的额定电流可高达数万安，这类刀开关一般采用多回路导体并联结构，并可用水冷却方式散热以提高刀开关导体所能承载的电流密度。

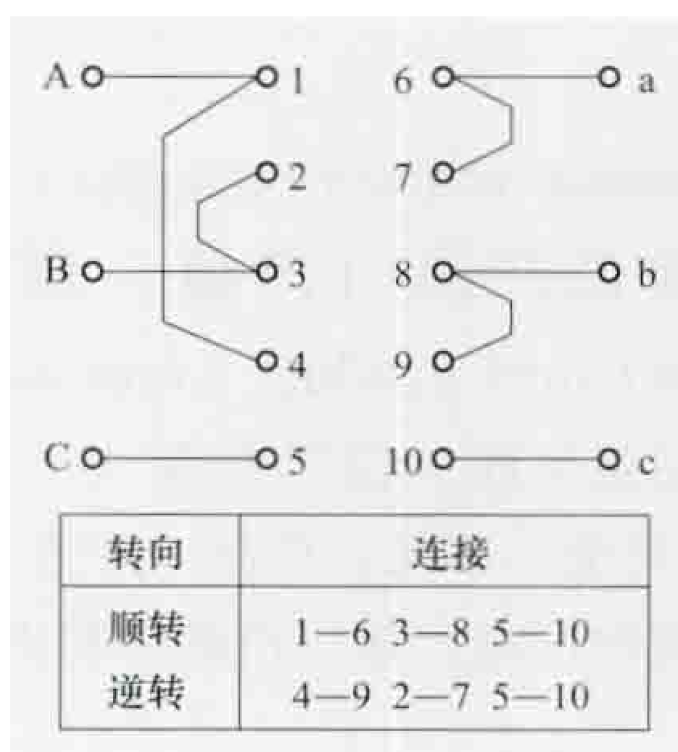
刀开关按极数可分为单极式、二极式、三极式，单极式刀开关与二极式刀开关可用于直流或交流电路，三极式刀开关是专为交流三相电路而设计的。按投掷方式可分为单投式和双投式，双投式可用作双电源的转换开关。按操作方式可分为手柄直接操作式和杠杆操作式。杠杆操作的刀开关用于配电柜内，刀开关装在柜中，操作手柄装在柜的面板上，并通过杠杆进行分合操作。

一般刀开关的刀刃分合速度与手柄操作速度有关，有时为了避免由于手柄操作速度过慢而被电弧烧坏刀刃，触刀上设计有速断刀刃，并加装灭弧室，可提高刀开关的分断能力。刀开关在电路中要求能承载短路电流的冲击，即能承受短路电流的电动力作用和热作用，不致使触头斥开、熔焊或变形。

熔断器式刀开关将刀开关与熔断器组合在一起，开关的静触头固定在底座或插头座上，而开关的动触头由熔断体组成，在电路中用于隔离电源，也能接通和分断电路额定电流，还可作电路的过负荷和短路保护。熔断器式刀开关用途广泛，如用作小型工矿企业的低压配电支路开关、生活用电支路开关、小型电动机的电源开关等。

daoshun kaiguan

倒顺开关　(reversible switch)　能转换电源输出端三相电流相序的开关电器，又称转换开关。主要由静触头、动触头、操动机构及外壳构成。静触头一般固定于绝缘材料制成的底座上，动触头则装于附有操作手柄的绝缘转轴上。扳动手柄时，动触头随转轴一起转动而变更其断通位置，从而改变电源输出端电流的相序，实现对电动机的倒顺控制。它的作用是连通、断开电源或负载，可以使电动机正转或反转，主要用作三相小功率电动机正反转的电气元件，但不能作为自动化元件。图中示出了由10个静触头组成的倒顺开关原理接线图。



转向	连接
顺转	1—6 3—8 5—10
逆转	4—9 2—7 5—10

倒顺开关原理接线图
1～5—输入端；
6～10—输出端

倒顺开关有结构简单、操作及安装方便、造价低廉等优点，但因触头系统无灭弧装置，为防止操作时的电弧短路，仅电极间用绝缘板隔离电弧，从而限制了通断能力的提高，一般仅用于10kV及以下小型异步电动机的直接起停及倒顺控制。因倒顺开关不能切断故障电流，使用时应与保护接地相配合。为保证操作人员的安全，其金属外壳应可靠接地。

daolu zhaoming

道路照明　(road lighting)　夜间为车辆和行人提供必要的能见度而设置的照明。道路照明（见图1和图2）能改善交通条件，减轻驾驶员疲劳，有利于提高道路通行能力和保证交通安全，此外，还可美化市容。道路照明的类型有机动车道路照明和非机动车与人行道路照明两大类，其中机动车道路照明又分为主干路、次干路和支路照明三级。



图1　上海城市道路照明（张亚棣　摄）



图 2　上海外滩路灯照明

评价标准　国际照明委员会和世界上多数国家都是以亮度为依据制定道路照明标准的，但同时也接受照度这一评价系统。中国道路照明标准中规定以路面平均亮度（或平均照度）、路面亮度总均匀度和纵向均匀度（或路面照度均匀度）、眩光限制、环境比和诱导性为机动车道路照明评价指标；路面平均照度、路面最小照度和垂直照度为非机动车与人行道路照明评价指标。

照明方式　包括常规照明和高杆照明。

常规照明　灯具通常安装在高度为 15m 以下的灯杆上，按一定间距有规律地连续设置在道路的一侧、两侧或中间分车带上进行照明的一种方式。采用这种照明方式时，灯具的纵轴垂直于路轴，使灯具所发出的大部分光射向道路的纵轴方向，灯具的悬挑长度不宜超过安装高度的 1/4，灯具的仰角不宜超过 15°。常规照明灯具布置一般有单侧布置、双侧交错布置、双侧对称布置、中心对称布置和横向悬索式布置。5 种布置方式有时可结合使用，如中心对称布置和双向对称布置方式，常常在双幅路上结合使用，对单向道路来说，相当于双侧交错布置或对称布置。此外还有在一基杆上安装多台常规路灯的情况，也可列入常规照明的范畴。常规照明灯具的安装高度、间距、悬挑长度和仰角，在设计时按设计标准经计算确定。

单侧布置方式适合于比较窄的道路，灯具安装高度等于或大于路面有效宽度。该布置方式的优点是诱导性好，造价较低；缺点是不设灯的一侧路面亮度（或照度）比设灯的一侧低，导致两个不同方向行驶的车辆得到的照明条件不同。

双侧交错布置方式的灯具按“之”字形交替排列在道路两侧，要求使用的灯具安装高度不小于路面有效宽度的 0.7 倍，这种方式适合比较宽的道路。交错布置的优点是亮度总均匀度高；缺点是亮度纵向均匀度一般较差，诱导性不如单侧布置好，有时会使驾驶员对道路光向产生混乱的印象。

双侧对称布置方式的灯具对称排列在道路两侧，适合于较宽路面照明。它要求灯具安装高度不应小于路面有效宽度的 1/2。在有中央分车带且其宽度大于单向道路宽度的 1/3 的双幅路上采用对称布置时，其效果相当于两个独立的单侧布置，因此应按单侧布置处理。

中心对称布置方式适合于有中间分车带的双幅路，灯具安装在位于分车带的 Y 形或 T 形灯杆上。灯具安装高度应等于或大于单向车道的有效宽度。

横向悬索式布置方式把灯具悬挂在横跨道路的缆绳上，灯具的垂直对称面与道路轴线成直角。灯具安装高度一般为 6～8m，多用于树木较多，遮光比较严重的道路。由于挂在缆绳上的灯具容易摆动，以致对驾驶员造成间歇性闪烁眩光，一般不推荐这种布灯方式。

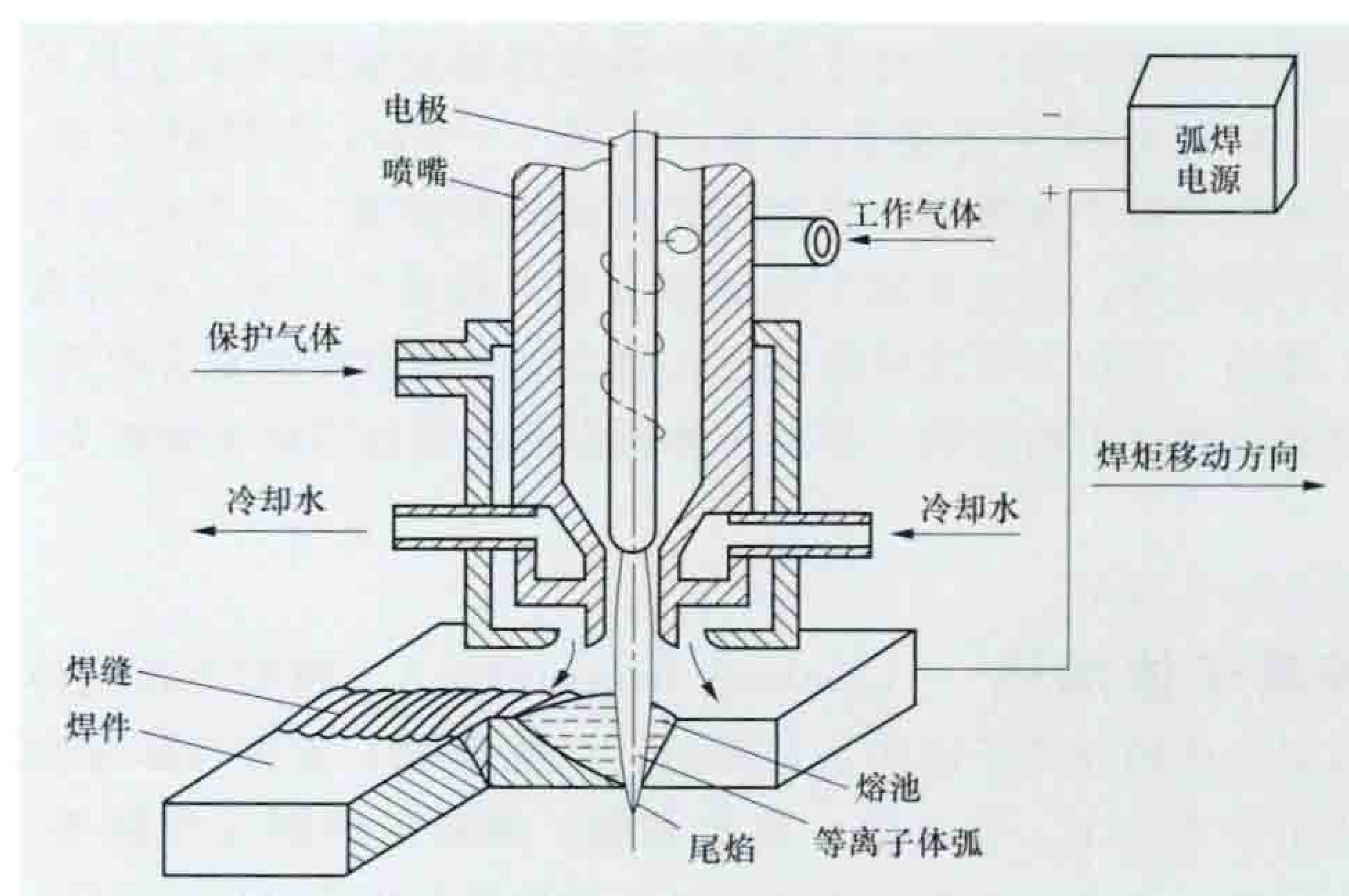
高杆照明　主要用于城市道路和公路、立交桥、广场、体育场、机场、港口码头等大面积照明，通常灯具安装在高度不小于 20m 的灯杆上。

dengliziti huhan

等离子体弧焊

（plasma arc-welding）　利用电弧等离子体作为热源的电弧焊。可用于碳钢，合金钢和铝、铜、镍、钛及其合金的焊接。充氩箱内的等离子体弧焊可用于钨、钼、钽、铌等难熔金属的焊接。

如图所示，工作气体用来保护电极并产生电弧等离子体，从喷嘴外侧喷出的保护气体用来保护焊接区。焊接时电弧由高频振荡器在电极与喷嘴间引发，有时也可由电极与喷嘴的接触短路引发并转移到电极与焊件之间（有时在电极与喷嘴间仍保留有电弧）。电极与焊件间的电弧经喷嘴的机械压缩、气流的热压缩和电流的磁压缩，形成一个截面积小、电流密度大、电离度高的弧柱。与弧柱接触处的焊件金属被迅速熔化形成熔池。随着弧柱的移动，熔池冷凝成为焊缝。电极一般用钨极，在某些情况下用水冷铜电极。工作气体用氩、氩与氢或氩与氦的混合气体，保护气体一般用氩气。



等离子体弧焊示意图（小孔焊）

等离子体弧焊的特点：①功率密度高，能够达到(0.5～1)×10^5 W/cm^2；②电弧稳定性好，焊接电流小到 0.1A 时，电弧仍能保持良好的挺度和方向性；③焊工操作方便，允许弧长有较大变化而不致影响焊件的热输入；④电弧穿透力强，不开坡口能一次焊透 12mm 不锈钢板或钛板；⑤焊接速度快；⑥焊件残余应力与变形小；⑦钨极端头位于喷嘴口内，焊件不易被钨污染；⑧钨极冷却好，不易被熔化；⑨等离子体弧焊需要用氩，与一般电弧焊比，焊接成本较高。

焊接方法　主要有穿透焊、熔透焊和微弧焊 3 种。

穿透焊　又称小孔焊，焊接电流在 100～400A 范围内。焊接时，熔池前沿有一个穿透小孔，如图所示。熔池金属向小孔后方流动形成单程双面的全焊透焊缝。厚度 2.5～6mm 的绝大多数金属都可获得小孔效应。穿透焊的焊接规范较严，需要自动焊机施焊。当用脉冲弧焊电源时，可以以较小的平均焊接电流实现穿透焊。

熔透焊　焊接电流在 30～100A 范围内。焊接中不出现穿透小孔，而靠熔池的热传导实现焊透。厚度 0.8～3mm 的大部分金属对接或搭接接头都可以用此法焊接，可用手工操作。

微弧焊　又称微束等离子体弧焊、针弧焊。焊接电流在 0.1～30A 范围内，所产生的电弧是长针形的。该方法特别适用于厚度为 0.02～1.5mm 的薄件的焊接，一般用手工操作。焊接时，为维持电弧稳定，除电极与焊件间的主电弧以外，还需要用另一个电源在电极与喷嘴间形成一个维持电弧。

焊接设备　用于等离子体弧焊的装备由*弧焊电源*及其控制部分、焊炬、工装夹具和导向用的组装件、气体管路和必要的减压阀、流量计等组成，有用手工操作的，也有自动的。弧焊电源应具有陡降特性。

历史与发展　等离子体弧焊是 1957 年美国的 R. 盖奇（R. Gage）发明的。早期的等离子体弧焊是大电流的，焊机用机械操作。20 世纪 70 年代，电流小到 0.1A 的小型手工操作的微弧焊机投入使用。90 年代，等离子体弧焊已在航空、航天、核能等高技术工业部门中作为重要加工手段，并已推广到机械、电子、仪器仪表等工业部门。20 世纪末，等离子体弧焊派生出许多新工艺：①微束等离子体弧焊，可以用来焊接极薄件、集成电路等，已广泛用于薄钢带、薄壁管、屏蔽套、汽车蒙皮、波纹管、膜盒、热电锅、筛网、灯丝组件和真空管器件等的焊接。②熔化极等离子体弧焊，可提高焊接效率和焊接速度，改善焊缝质量；厚板结构的焊接尚处于研究阶段。③交流等离子体弧焊及反极性等离子体弧焊，特别适用于焊接铝合金，可焊 4～6mm 的厚铝合金。④脉冲等离子体弧焊，能大幅度提高焊接质量。⑤窄间隙等离子体弧焊，能显著减少焊缝金属量，提高生产率。⑥等离子体焰，可作为喷涂热源进行表面改质和制造新型复合材料。随着高新技术的发展，等离子体弧焊的应用范围将不断扩大。

dengliziti jiare

等离子体加热

(plasma heating)　利用工作气体电离形成的等离子体作为热源进行的*电加热*。工作气体根据使用要求有氮、氢、氩，或氮和氩、氩和氢的混合气体等。在化学工业中，工作气体也可以是某种参与化学反应的气体。

等离子体加热的特点：①温度高；②功率密度大，热量集中；③等离子体一般呈中性，可避免物料的氧化和还原，还可在真空或控制气氛中加热；④等离子体可有极高的流速，有利于某些作业如切削、喷涂等的进行；⑤与*电子束加热*和*激光加热*相比，设备和生产费用都较低，更适合于碳钢、低合金钢等一般材料的加工；⑥易于与其他加热方法（如*感应加热*、*燃料加热*等）配合，取长补短；⑦正、负离子可促使很多化学反应产生；⑧用不同工作气体可获得不同化学活性的等离子体；⑨能用磁场控制等离子体的分布和运动，有利于化工过程的进行；⑩高频等离子体洁净，加热时不会使物料受污染等。

等离子体　气体电离形成的等离子体是由未电离的气体分子、原子以及总电荷量相等的正离子、自由电子和负离子组成的，其聚集态列在固态、液态和气态之后，称为物质的第四态。等离子体在宏观上呈中性，但有较大的电导率，其运动主要受电磁力的支配。等离子体有很高的温度，气体电离的程度愈高，等离子体的温度也愈高。

根据电离度的不同，等离子体分为超高温、超高能量密度的完全电离等离子体（如核聚变）和电离度不足 1% 的弱电离等离子体（如电弧放电等）两大类。工业上应用的等离子体属后者。这种弱电离等离子体根据其中性粒子、离子、电子三者之间是否呈热平衡态，又分为平衡等离子体（高温等离子体）和非平衡等离子体（低温等离子体）两类。

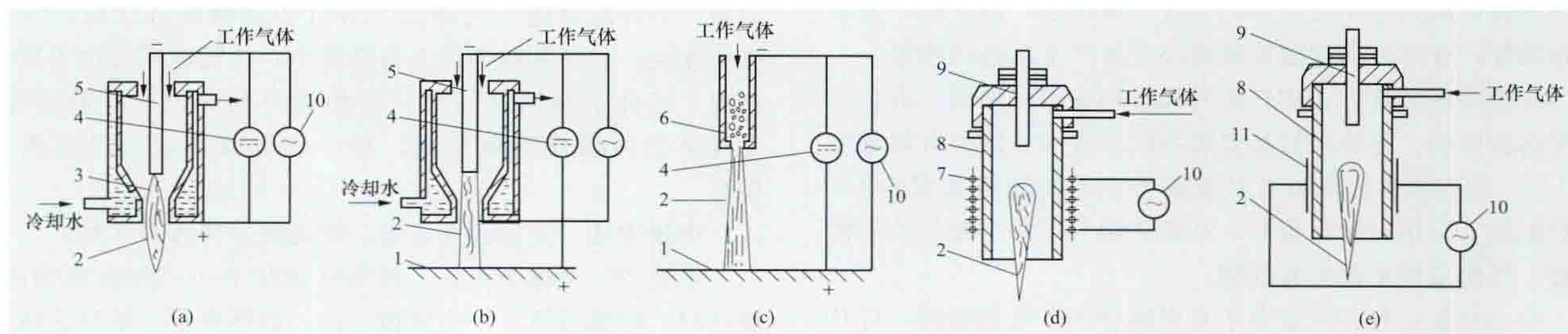
高温等离子体　温度很高，约为 4500℃ 至数万摄氏度，热容量也非常大，主要用于物料的加热、熔化。

低温等离子体　在真空条件下，用高压电场或灯丝电子发射等方法使工作气体电离而成，温度较低，一般不超过 1000℃，而且热容量也非常小，主要用于材料表面处理，有离子渗、离子溅射、离子蒸镀、离子刻蚀、离子注入等。2004 年，国际电工委员会（IEC）将低温等离子体加热归入*辉光放电加热*。

装置构成　主要由等离子体枪、电源、加热设备组成，另配有控制系统、气路系统和冷却系统等。

等离子体枪　又称等离子体发生器、等离子体炬等，有电弧等离子体枪和高频等离子体枪两种。其工作原理如图所示。在图（a）中，阴极（通常用钨钍或钨铈电极）与作为阳极的铜喷嘴之间产生由工作气体弧光放电而形成的电弧。电弧等离子体由于工作气体的压力和喷嘴口的压缩而形成小直径的流束，其温度在 3000℃ 以上，气流速率一般在 10m/s 以上，可高达 5000m/s。因为电弧没有转移到被加热物料上，所以叫非转移弧式等离子体枪。高频电源用来引发电弧，电弧形成后即断开。

在图（b）中，电极与喷嘴之间产生的电弧在生成后即被转移到接电源阳极的物料上，所以叫转移弧式等离子体枪。在阴极与物料间的电弧由于机械压缩效应（由喷嘴口引起）、热收缩效应（由于弧柱中心比其外围温度高、电离度高、电导



等离子体枪原理示意图

（a）非转移弧式等离子体枪；（b）转移弧式等离子体枪；（c）中空阴极式等离子体枪；（d）高频感应式等离子体枪；（e）高频电容式等离子体枪
1—被加热材料；2—等离子体焰；3—电弧；4—直流电源；5—钨钍或钨铈阴极；6—中空阴极；7—高频线圈；
8—绝缘筒（如石英管）；9—引燃电极；10—高频电源；11—极板

率大，电流自然趋于弧柱中心）和磁压缩效应（由弧柱本身的磁场引起）三者的联合作用，而受到强烈压缩，弧柱变得细长（细如针，长可达 1m 以上）。在与弧柱内部膨胀压力保持平衡的条件下，弧柱中心气体高度电离，其温度可达 10 000～52 000℃，气流速度可高达 10 000m/s。转移弧式等离子体枪在等离子体加热中用得最广。在实际应用中，有时除阴极与物料之间的电弧——主电弧外，仍保留阴极与铜喷嘴间的电弧——维持电弧，两者合称混合弧。

图（c）所示等离子体枪用钽管作阴极，称中空阴极式等离子体枪。钽管内的工作气体先由高频电源电离，生成的正离子轰击钽管，使其温度上升，自行发射电子。阴极与物料间的等离子体弧与转移弧类似。钽比钨更容易发射电子，但易氧化，须在真空中工作，因此，供给物料的能量中有较大部分由阴极发射的电子束提供。此外，电弧等离子体枪（或装置）还有其他形式，如石墨中空阴极式、石墨套管式、三相石墨电极式等。

在图（d）和图（e）中，工作气体分别通过高频感应线圈和电容式电极激发电离，所生成的等离子体可经由喷口喷出形成等离子体焰，也可留在工作区内供加热物料用。高频等离子体的优点是不受电极材料的污染，但生产成本高，发生器功率小，用得较少。

等离子体枪还可分为交、直流两种形式，直流的加热效率较高，可达 80%。

电源　电弧等离子体枪的电源一般用具有陡降外特性的直流电源，也有用三相交流电源的。其空载电压：用于机械加工的一般在 75～400V 范围内，用于熔炼的可高到 3000V 以上。高频等离子体枪的电源通常用电子管或半导体高频振荡器，频率在 0.4～75MHz 范围内。

加热设备　随装置用途而异，如对等离子体熔炼，其加热设备为具有耐火材料炉衬（见炼钢电弧炉）或水冷结晶器（见真空电弧炉）的炉体；对等离子体切割和喷涂装置为工作台或工作小车；对化工生产则为反应罐等。

应用　等离子体加热用于冶金、机械、化工、航空、建筑等许多工业部门。

在冶金工业中，等离子体加热用于炼钢、炼钛；处理炼钢电弧炉等废气中的粉尘，以回收合金元素；与感应熔炼炉配合以强化精炼过程；加热为连铸机提供钢水的钢水包等。设备以有耐火材料炉衬的等离子体炼钢炉用得较普遍，1983 年容量已到 45t（在奥地利投产，用 4 支 6MW 直流等离子体枪），具有金属收得率高、噪声低、无电压闪变等优点，生产成本可低于炼钢电弧炉，但限于枪的输出功率，炉子容量尚小。等离子体加热用于处理炼钢电弧炉的粉尘时，具有炉子密封性好、有的粉尘不必预先烧结、可确保炉内的还原条件、操作方便、设备和生产费用低等优点，已有较大发展。

在机械加工中，等离子体加热用于焊接（见等离子体弧焊）、切割、喷涂（包括堆焊）和金属表面处理等。等离子体切割主要用于不锈钢、高合金钢、铸铁、铜、铝及其合金、钨、钼等，有逐步应用于碳钢和低合金钢的趋势；另外，还用于矿石、水泥板、陶瓷等非金属材料的切割。它有切口窄、切割边质量好等优点，切割厚度可达 150～250mm。20 世纪 70 年代后期还发展了双层等离子体切割、微弧等离子体切割、喷水等离子体切割等。通常，切割金属薄板和非金属材料用非转移弧，切割金属厚板用转移弧。等离子体喷涂分粉末等离子体喷涂和填丝等离子体喷涂两种，前者用得较多并主要用非转移弧，有时用混合弧。等离子体喷涂用于工件表面喷涂耐高温、耐磨蚀的高熔点金属或非金属涂层，以提高工件表面的机械性能或对受损工件进行堆焊修补，有工件变形小，喷涂层平滑整齐，易实现机械化、自动化等优点，广泛用于阀门、模具以及电站、化工、石油机械上耐磨耐蚀件的制造和维修。

在化学工业中，等离子体加热用于制取乙炔、硝酸、联氨、炭黑等化工产品，合成高温碳化物、氮化物和硼化物（如碳化钨、氮化钛），制取超细粉末（如 0.01～1μm 的三氧化二铝、二氧化硅和氧化硅粉）等。高频等离子体用于制取高纯材料，如石英玻璃、单晶、钛白粉等。

等离子体加热还在航空工业中用于加热风洞中的空气，在建筑工业中用于喷饰建筑物外表面等。

历史与发展　等离子体加热的工业应用始于 20 世纪 50 年代，美国首先将其用于切割和焊接；60 年代，主要用于废铁的熔炼和乙炔的合成。60 年代末，美国成功地研制出功率为 52MW 的等离子体发生器，供加热风洞中空气之用。80 年代，等离子体加热的工业应用进入最活跃的时期，奥地利、美国和联邦德国等开发了用于特种钢和难熔金属的熔炼、中间包钢水加热、钢包烘烤、钢包精炼、化学气相沉积、喷镀以及等离子体冲天炉复合加热熔炼等技术和设备。90 年代，鉴于环境保护的目的，等离子体加热开始用于垃圾焚烧以及核废料、放射性废弃物和医疗废弃物等的无害化熔融、减容处理。中国从 60 年代开始等离子体加热的应用，首先在切割和喷涂方面。西安电炉研究所于 70 年代末开始等离子体枪的研究，80 年代初成功地研制出 100kW 实验室用等离子体熔炼炉。1998 年上海交通大学自行开发了 650kW 等离子体枪。其应用还在不断扩大，如上述冶金工业中的各种应用、等离子体弧焊和煤粉燃烧器的点火等。

diguanliang diandongji

低惯量电动机　(low-inertia motor)

采用专门的措施减小转子转动惯量的控制电机。其工作原理与同类型的伺服电动机相似。由于低惯量，灵敏度高，机械过渡过程短，控制系统准确性好。常用的低惯量电动机有低惯量套筒形转子电动机和低惯量无槽直流电动机两种。

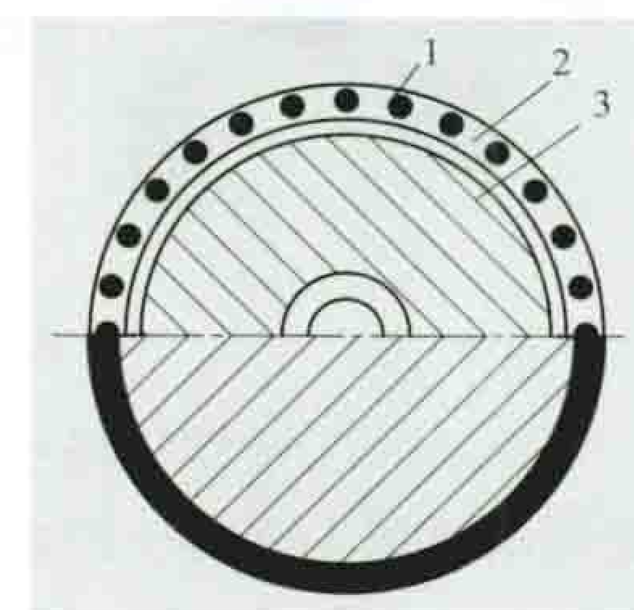


图 1　低惯量套筒形转子电动机电枢结构示意图
1—铝导条；2—套筒；3—内定子铁芯

低惯量套筒形转子电动机　图 1 所示为低惯量套筒形转子电动机电枢的结构示意图。它由套筒形笼型转子和装在套筒内的内定子铁芯两部分组成。套筒形转子有一个用电工钢制成的空心套筒和嵌在套筒上的一些铝质笼型导条，套筒两端由法兰盘固定在输出轴上。内定子铁芯用硅钢片叠成，两端用滚珠轴承支撑在输出轴上。它与输出轴之间只有轴承中产生的摩擦阻力，因此，由内定子铁芯所增加的转动惯量很小，电动机的转动惯量主要取决于套筒形转子。这种转子比杯型转子机械强度高，功率可大为增加。但这种转子结构复杂，制造困难。

低惯量无槽直流电动机　尽量选用较小的电枢直径和较长的电枢长度，采用无槽电枢结构，如图 2 所示。无槽电枢的铁芯先用绝缘带缠绕一层，然后用环氧树脂将绕组固定在电枢表面上，再缠绕一层绝缘带，其机械强度与有槽电枢相近。

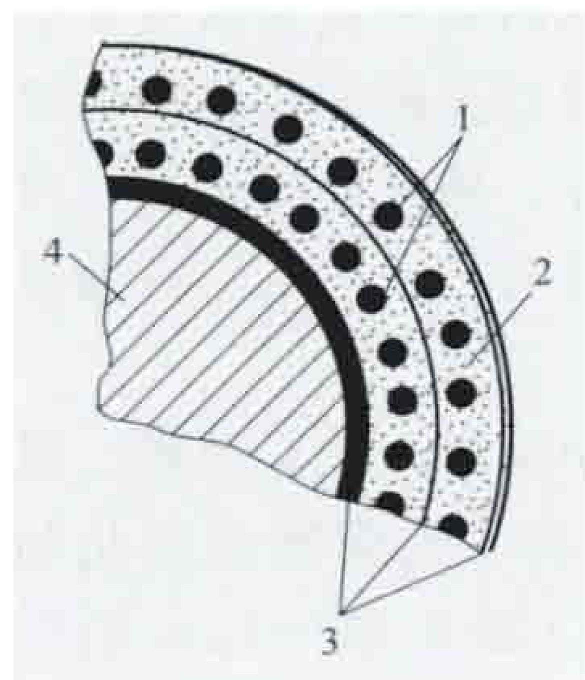


图 2　低惯量无槽直流电动机电枢结构示意图
1—绕组；2—环氧树脂；3—绝缘带；4—铁芯

由于电枢无槽，不必考虑气隙磁密因齿磁密过高而受到限制，设计时可选取较高的气隙磁密，使无槽电枢铁芯减小，一般比有槽电枢大约可减小一半。又由于电枢绕组固定在无槽电枢表面上，冷却效果较好，设计时可选取电流密度较高、截面积较小的导线，这使电枢质量减轻，转动惯量降低。此外，由于电枢绕组固定在电枢铁芯表面上，绕组的电感较小，使电抗电动势减小，从而改善了换向，减小了电动机的机电时间常数，快速响应性好。

diya dianqi

低压电器　（low-voltage apparatus）　在低压电路中起切换、控制、保护、检测、变换和调节作用的元件或设备。国际电工委员会（IEC）标准规定：交流电压为 1000V、直流电压为 1500V 及以下的电器属低压电器。中国规定：交流电压为 1200V、直流电压为 1500V 及以下的电器属低压电器。图 1 和图 2 所示均属低压电器。


图 1　开关电器

分类　①按应用场所的不同，分为配电电器和控制电器。配电电器指主要用于配电系统，对线路及设备进行通断、控制、转换电源或负载以及保护的电器。这类电器有刀开关、低压负荷开关、低压断路器、熔断器等。控制电器主要指用于电力拖动和自动控制系统及用电设备中控制受电的设备。这类电器有接触器、起动器、继电器、主令电器、控制器等。②按用途可分为一般用途低压电器、牵引低压电器、矿用低压电器、船用低压电器、航空用低压电器等。③按功能可分为开关电器和非开关电器。开关电器指用于接通或分断一条或几条电路电流的电器。非开关电器中如电阻器、变阻器是用于将电能转换为热能、限制与调节电路电流参数等的电器；又如电磁铁是用于将电转换成力的电器。④按有无触头可分为有触点电器和无触点电器（见无触点开关）。



图 2　双电源开关

基本性能要求　①有足够的绝缘性能，保证产品的耐压强度和绝缘距离；②工作时电器的温升应不超过允许值；③对开关电器来说有接通、分断及承载能力的要求；④对工作于特殊环境的低压电器应满足在有关环境（如潮湿、振动、冲击、防爆等）条件下的要求；⑤对不同的电器还有各自的技术性能要求等。

沿革与发展　20 世纪六七十年代，开发出统一设计的第一代低压电器产品。1978～1990 年，引进国外先进技术，制造了第二代产品。1990～2005 年，自行开发试制了智能化的第三代产品，总体技术性能达到或接近国际上 20 世纪 80 年代末 90 年代初的水平。进入 21 世纪，各企业正自主研发具备网络化、可通信功能的第四代智能电器。

低压电器的发展方向：①设计趋于小型化、模块化、组合化，可实现安装的高密度化，既节省了材料，又降低了制造成本。②加工设备的数控化、装配工艺的自动化及在线检测技术的应用，提高了产品质量稳定性、一致性和可靠性。③对产品的技术性能逐步提出工作可靠性指标要求。④利用虚拟样机技术可以缩短低压电器开发周期，降低开发成本。⑤广泛应用微机控制技术、计算机数字通信技术，利用漏电保护无死区技术、开关电器分断的无弧或少弧技术、区域联锁保护技术等促进低压电器智能化技术的发展。

diya duanluqi

低压断路器　（low-voltage circuit breaker）　在交流电压 1200V、直流电压 1500V 及以下配电线路中能自动接通、承载和分断电路电流的开关电器，又称自动空气开关、自动开关、自动断路器。电路运行条件分为正常和非正常（如过载、短路、欠电压等）两种情况。一般用途的低压断路器可用于交流电路及直流电路中，有些断路器专为交流或直流电路而设计，因此它只能适用于某一种电路。低压断路器的主要技术参数有额定电压、额定电流、脱扣器动作特性、分断能力、短时耐受电流、限流能力、操作性能（机械寿命和电寿命）、允通能力等。

结构　低压断路器由触头系统、灭弧系统、过电流脱扣器、操动机构、框架或外壳及附件等组成。

触头系统用于通断电路，并在接通位置时承载电流。有的低压断路器触头分为主触头和弧触头。前者仅用于在接通位置时承载主电路电流，后者用于通断电路时产生并承受电弧。

灭弧系统用于熄灭触头电弧，该电弧是在触头通断电流时产生的。

过电流脱扣器与断路器机械传动机构相连，用以释放锁

扣件并使断路器分断。

操动机构包括断路器动作的机械操作与传动机构及防止合闸机构。防止合闸机构用于防止在联锁机构不允许合闸情况下误合闸。

框架或外壳把以上各部分组合在一起，通常为金属框架或塑料外壳。

附件作为断路器功能的派生补充，为断路器增加了控制手段和保护功能。内部附件包括辅助触头、报警触头、分励脱扣器、欠电压脱扣器等；外部附件包括电动操动机构、释能电磁铁、转动操作手柄、加长手柄、手柄闭锁装置等。

工作原理 图1所示为一个三极低压断路器原理示意图。断路器的主触头串联于三相电路并处于接通状态，传动杆由锁扣钩住，分断弹簧受到拉伸。当电路电流超过一定值时，过电流脱扣器的衔铁吸合，顶杆向上运动将锁扣顶开，分断弹簧使触头分断。当电路电压降低至一定值时，失电压脱扣器的衔铁释放，将锁扣向上顶开，使触头分断。分励脱扣器由控制电源供电，可以根据操作人员的命令或其他信号使线圈通电，其铁芯向上运动并驱动断路器触头分断。

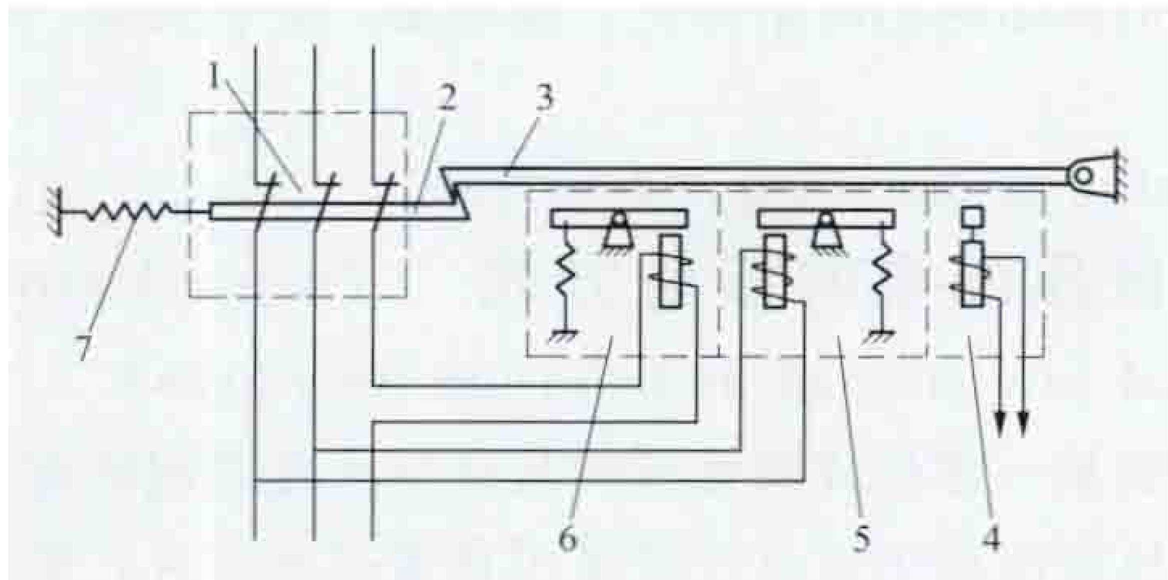


图1 三极低压断路器原理示意图
1—主触头；2—传动杆；3—锁扣；
4—分励脱扣器；5—失电压脱扣器；
6—过电流脱扣器；7—分断弹簧

低压断路器的分断能力较高，主要是其操动机构为典型的五连杆机构，其分合闸过程是一个瞬间的动作过程，包含高速的碰撞。低压断路器分闸时，操动机构处于图2(a)所示的位置，合闸时，作用到手柄11上的操作力通过弹簧7传递到连杆机构的4点，并带动机构快速运动，低压断路器快速合闸，达到图2(b)所示的位置。在短路电流产生而脱扣器未动作之前，如果电动斥力足够克服触头预压力和触头重力，动触头可被斥开一定的角度，当短路电流引起锁扣12转动时，在分断弹簧7作用下，跳扣13绕轴6逆时针转动，5点成为活动点，同时连杆3-4、4-5脱离死区，变成五连杆机构，触头快速分断，低压断路器脱扣。由于五连杆机构有两个自由度，低压断路器在脱扣状态下，触头处于打开位置，如图2(c)所示，此时断路器无法闭合。

分类 低压断路器分类方法有多种：①按用途可分为配电线路用、电动机用、照明线路用和漏电保护（剩余电流动作）用断路器等。②按在短路情况下的使用类别可分为A类和B类。A类断路器在短路情况下无选择性保护所需要的人为短延时，因而无短时耐受电流要求；B类断路器在短路情况下，可实现选择性保护，有人为短延时，因此有短时耐受电流要求。③按极数可分为单极、二极、三极、四极断路器。单极断路器用于交流单相线路，二极断路器用于单相或两相线路，三极断路器用于三相线路，四极断路器用于三相四线制线路；而用于直流电路的仅有单极和二极断路器。④按结构形式可分为万能式（框架式）断路器、塑料外壳式断路器、小型断路器。万能式断路器和塑料外壳式断路器主要用于低压配电线路过载、短路或欠电压保护，也可用于不频繁接通和分断电路，而小型断路器主要用于终端配电系统导线和家用电器过载与短路保护。⑤按电流性质可分为交流、直流和交直流断路器。一般的低压断路器可在交流电路及直流电路中工作。在大功率直流电路中需使用直流快速断路器，这种断路器的动作时间极短，灵敏度高，限流能力强，能较好地保护硅整流装置。⑥按有无限流作用分为限流式和非限流式。限流式断路器带有电动斥力快速脱扣机构，分断时间短，电路发生短路时，短路电流还没有上升到最大值，断路器触头已分断，它对短路电流有限流作用，大大减轻了短路电流对电气设备产生的破坏作用。非限流式断路器无法限制短路电流的增长，承受短路电流时间长，因此分断能力低。另外，低压断路器还可以按传动方式、脱扣器种类等分类。

发展趋势 低压断路器将向大容量、高性能和智能化方向发展。限流技术和灭弧技术使低压断路器的短路分断能力不断提高。缩短选择性保护时间，可以降低电气设备动稳定和热稳定要求，实现全范围选择性保护，从根本上避免低压配电系统越级跳闸和故障级断路器正常分断后上级断路器同时分闸的问题。微处理器的应用使低压断路器具有智能保护与控制功能。现场总线技术的应用使低压断路器成为网络电器，实现双向通信与远程监控功能。

diya fuhe kaiguan

低压负荷开关 (low-voltage switch-fuse) 由一个极或几个极的刀开关与熔断器串联构成一个组合单元，能在正常的导电回路条件或规定的过载条件下关合、承载和开断电流，也能在异常的导电回路条件（如短路）下按规定的时间承载电流的开关设备，又称开关熔断器组。按照需要，也可具有关合短路电流的能力。低压负荷开关是介于断路器和隔离开关之间的一种开关电器，具有简单的灭弧装置，能切断额定负荷电流和一定的过载电流，但不能切断短路电流。低压负荷开关常用作380V及以下电压等级的电气照明线路、电热设备线路和分支电路的配电开关，适用于不频繁地手动操作。低压负荷开关按结构

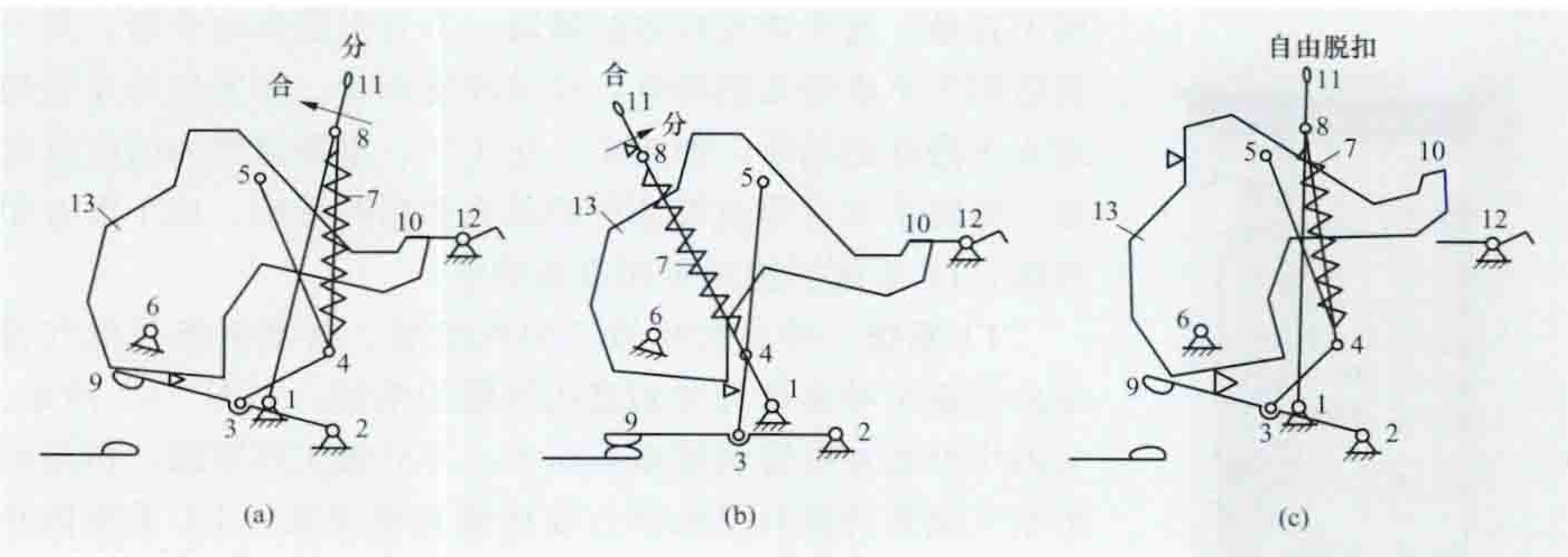


图2 低压断路器处于分闸、合闸、脱扣状态时的操动机构示意图
(a) 分闸状态；(b) 合闸状态；(c) 脱扣状态
1、2、6—转轴；3-4—下连杆；4-5—上连杆；7—弹簧；8—弹簧与手柄连接点；9—触头；
10—锁扣与跳扣连接点；11—手柄；12—锁扣；13—跳扣

分为开启式和封闭式。无封闭外壳的结构即为开启式。

常见的胶盖瓷底闸刀开关是一种开启式负荷开关，它有一塑料盖，罩着触刀和熔丝，起阻挡电弧飞出的作用。开启式负荷开关分断电流的能力不高，使用上也不太安全。

封闭式负荷开关有一用钢板做成的封闭外壳，触头、熔断器、机构等都装在外壳内部，外壳外部无带电裸露部分，使用上比较安全。早期封闭式负荷开关产品的外壳用铸铁制成，所以又称为铁壳开关。封闭式负荷开关的操动机构采用杠杆传动和弹簧储能结构，使触头接通及分断速度与操作手柄的操作速度无关，这样就提高了开关的通断能力。机构的操作与防护门的位置相联锁，防护门在关闭后，手柄操动机构方能执行合闸，要打开防护门触头必须处于分断位置，既避免了操作人员被电弧灼伤的可能，又保证了更换熔丝等作业的安全。

diya kaiguangui

低压开关柜 (low-voltage switchgear panel) 由一个或多个低压开关电器和与之关联的测量、控制、保护等二次设备组装在一起的一种封闭的立式成套设备。按柜体上的元器件与柜体的连接方式可以分为固定式、抽出式和混合式3类。适用于额定电压为交流不超过1000V、直流不超过1500V、频率不超过1000Hz的配电和动力控制系统。

固定式低压开关柜（见图1）的开关器件直接固定在柜体上，为便于开关器件的维修和拆卸，也可选用插拔式开关，采用可分离式连接方式固定。固定式开关柜单柜的回路和隔室较少，常用的有Blockset-D、GGD、GGL、GBD、GBL、GDT、Skus等柜型。



图1 固定式低压开关柜典型结构

抽出式低压开关柜（见图2）柜内开关采用抽出式功能部件（如抽屉），一般由柜体、主母线室、配电母线室、电缆室、端子室、抽出式功能部件组成。抽出式功能部件通常有连接位置、试验位置、分离位置和移出位置，单柜开关回路和隔室较多，便于防范内部故障和方便检修、试验，常用的有OKKEN、GCK、BFC、MNS、CUBIC等柜型。

混合式低压开关柜开关器件采用固定接线与抽出式混合配置方式与柜体连接，通常容量较大的开关采用抽出式，其他的采用固定式，常用的有GHD、GHK、DOMINO等柜型。

低压开关柜的电气方案包括主电路和辅助电路两部分。主电路用来传输电能，一般由主母线、配电母线、进线单元、出线单元组成。辅助电路用于控制、测量、信号、调节、处理数据等电路上的所有部件。



图2 抽出式低压开关柜典型结构

低压开关柜的主要电气性能包括额定工作电压、额定绝缘电压、额定冲击耐受电压、额定电流、额定短时耐受电流、额定峰值耐受电流、额定限制短路电流、辅助电路额定电压、短路开断能力等。

智能化、小型化和模块化是低压开关柜的发展趋势。智能型低压开关柜应用带有智能型脱扣器、状态监测、电能管理和可通信模块等功能的智能化开关和电器元件，采用标准的现场总线或其他数字通信方式将具有通信能力的开关和电器元件相互连接起来，通过控制器或者主站实现对现场设备、配电系统的遥测、遥调、遥控、遥信功能；固态无触点开关、真空开关、无飞弧空气开关等新型高性能、小型化开关电器的应用，促进了紧凑型、多回路低压开关柜的发展；柜体结构趋向组合化、模块化，便于安装、组合和维护。

diya peidianwang jiedi fangshi

低压配电网接地方式 (neutral grounding method of low-voltage distribution networks) 低压配电设备的某一部位或配电网的某点与大地之间的连接形式。中国低压配电网中性点一般采用直接接地方式，也就是配电变压器低压侧的中性点采用直接接地的运行方式，这种接地按其作用称为*工作接地*。低压配电设备的另一种接地是*保护接地*，是指当配电网设备的金属外壳、构架、线路杆塔由于绝缘损坏有可能带电时，为了防止危及人身和设备的安全而设置的接地。另外，低压配电设备也有采用正常情况下不带电的设备金属外壳用保护线与“零线”连接起来的保护方式，叫*保护接零*。这时“零线”既是三相四线制电路中单相用户的一条工作线，又是配电设备外壳带电时的保护线，用PE表示。低压配电网的中性点接地方式需要与中性线、用电设备保护线的连接形式综合考虑，这样就形成了IT、TT 、TN三类系统。

IT、TT、TN的含义分别为：第一个字母表示配电系统对地关系，I表示不接地或经电阻接地，T表示直接接地；第二个字母表示装置外露的可导电部分的对地关系，T表示电气设备的金属外壳接地，并与配电系统接地相互独立，N表示电气设备的金属外壳接地，并与配电系统接地直接相连。

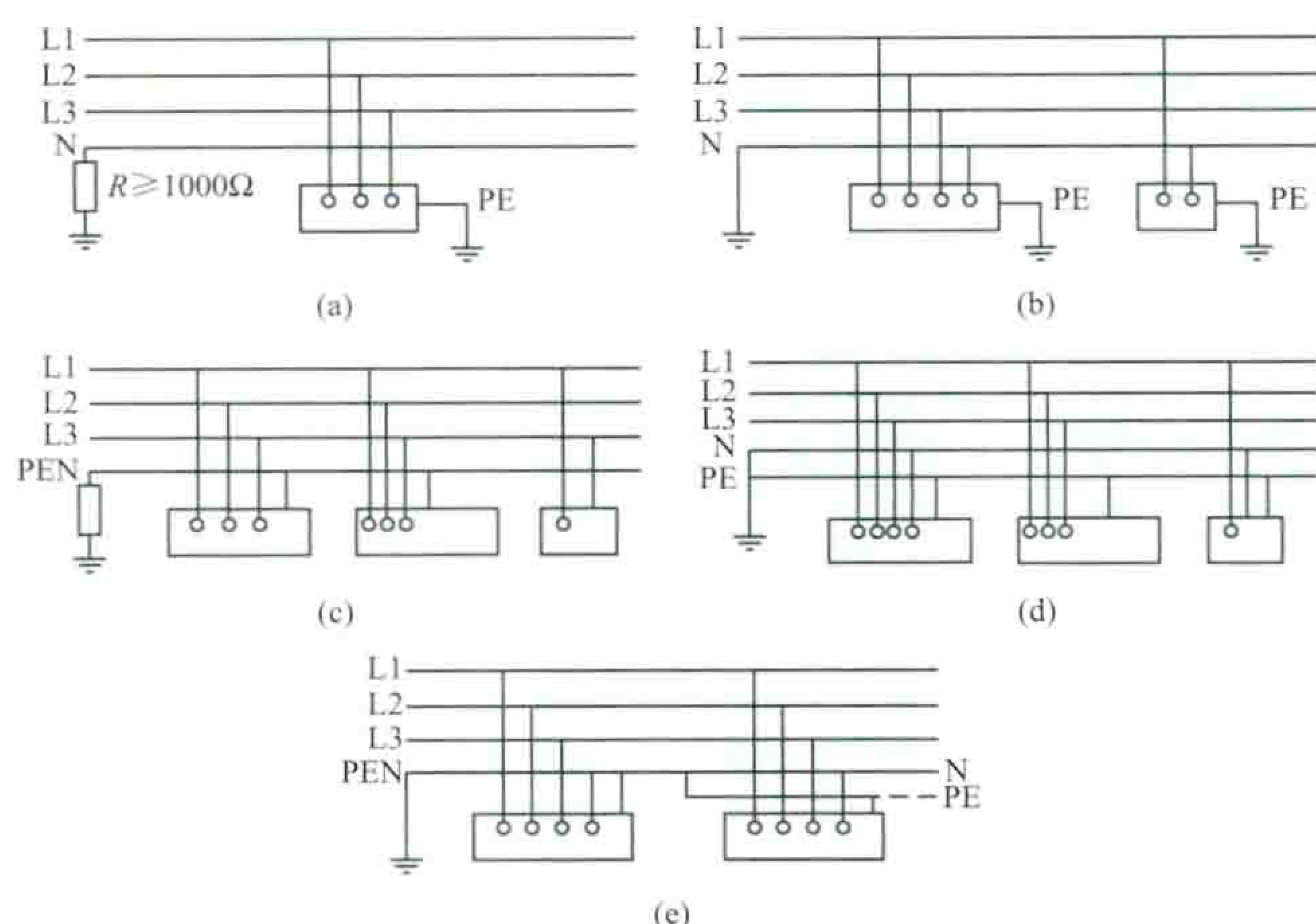
IT系统 三相三线中性点不接地，或经足够大的电阻（约1000Ω）接地，电气设备的外露可导电部分直接接地的系统，如图（a）所示。由于外壳与地之间的电阻很小，当人们接触到绝缘破坏的电气设备外壳时，外壳电位比较低，使流过人体的电流在容许的安全范围内。IT系统由于电源端不接地，发生单相接地故障时，不会引起供电中断。其一般适用于不准停电的场所，以及环境不良、易发生单相接地或火灾爆炸的场所，如煤矿、化工厂、重要建筑内的应急电源、医院手术室等重要场所的动力和照明系统。由于没有中性线，IT系统不能对单相设备供电。

TT系统 带中性线的三相四线制、电源系统与电气设备的外露可导电部分分别直接接地的系统，如图（b）所示。它的中性线在电源侧接地后引出，并只做工作零线，用电端的电气装置外露可导电部分在现场直接接地。TT系统防止用电设备绝缘破坏引起人体触电的原理与IT系统类似，但克服了IT系统不能给单相设备供电的缺点。发生单相接地故障时，通过接地电流使回路的过流装置动作，会引起供电中断。TT系统一般适用于对电压干扰要求高的精密电子和

数据处理设备或对防火防爆有要求的场所。

TN 系统 电源系统有一点直接接地，电气设备的外露可导电部分通过保护线连到此连接点的系统。根据中性线和保护线的布置不同，TN 系统又可分为 TN-C、TN-S 和 TN-C-S 3 种。中国推荐使用 TN-S 系统与 TN-C-S 系统。

TN-C 系统 带中性线的三相四线制系统，如图（c）所示。中性点直接接地，电气设备保护接地线 PE 和中性线 N 合二为一，使用一根 PEN 线与电源的接地装置直接相连，称其为保护接零系统。当电气设备绝缘破坏时，短路电源经电源相线、电气设备外壳，通过 PEN 线流向中性点，电流保护装置动作切断电源，保护人身安全。TN-C 系统 PEN 线同时作为工作线和电气设备保护接地连接线，简单方便。如果三相负荷不平衡，则 PEN 线中有不平衡电流，另外一些负荷设备引起的谐波也会注入 PEN 线，使 N 线带电，从而使设备的外壳也带电，对人身安全造成威胁。因此，TN-C 系统一般适用于三相负荷比较平衡、电路中 3 次谐波电流不大且有专业人员管理的一般性工业厂房和场所。



低压配电系统接地形式
(a) IT 系统；(b) TT 系统；(c) TN-C 系统；
(d) TN-S 系统；(e) TN-C-S 系统
N—系统中性线；PE—保护接地线；
PEN—保护接地线与中性线的公用线

TN-S 系统 三相五线制中性点直接接地，整个系统的中性线和保护 PE 线与中性点接地装置连接，如图（d）所示。这种接地方式可以避免由于末端线路、分支线路或主干线路断线所造成的危害。在此系统中，只有当保护线断开，且有一台设备发生相线碰壳时才会发生危险。通过采取相应措施，可大大减小设备外壳出现危险电位的可能性（如保护线采用一定截面的钢线或铜线以避免断裂），该系统得到越来越广泛的应用。但这种系统需要增加保护线，故工程费用较高。

TN-C-S 系统 三相五线制中性线直接接地，整个系统有一部分中性线与保护线是合一的，一部分是分开的，如图（e）所示。它由两个接地系统组成，一部分是 TN-C 系统，另一部分是 TN-S 系统，其分界面在 N 线与 PE 线的连接点。当电气设备发生单相碰壳时，故障同 TN-S 系统；N 线断开时，故障同 TN-C 系统。PE 线连接的设备外壳在正常运行时始终不会带电，所以 TN-C-S 系统提高了操作人员及设备的安全性。此系统已广泛应用于工业和民用建筑中，电源线路采用 TN-C 系统，进入建筑后分 PE 线和 N 线。这种线路系统简单，又能保证一定的安全水平。

dixia tiedao

地下铁道 （underground railway；metro） 修建于都市地下隧道内的一种高效、大运量全封闭的客运交通系统，简称地铁。地下铁道具有运量大、快速、安全、准时、舒适、不污染空气和市区环境、节能等优点。它与地面交通相比具有不占用市区用地，可以缓解大城市交通堵塞、拥挤，又可作为战时人防、运输和掩蔽场所等特点。

世界上许多国家的大城市都有以地铁作为主要公共交通的发展趋势，特别是近数十年来随着城区的扩大和卫星城镇的发展，城郊与市中心来往人员乘车距离延伸，为了解决和改善地面交通紧张状态和缩短乘车时间，一些国家均将地铁作为大城市的一种重要交通工具。

构成 地铁主要包括：①列车、线路、车站；②供电及变电所；③通信信号及调度指挥等系统；④运营及检修系统。它们相互构成一个整体，协调工作以保证地铁的正常运行。

列车、线路、车站 地铁列车均采用由电动客车组成的动车组。动车组之间可夹带无动力拖车。大多数列车的车轮用钢轮，也有用橡胶轮胎的。地铁列车车厢密闭性较好。地铁线路的轨道同地面铁路的轨道相似，一般采用标准轨距并采用较重型的钢轨。地铁在城市郊区可在地上或高架线路上运行。地铁车站（见图 1 和图 2）有不同模式，按运营性质可分为中间站、尽头站和换乘站；按站台与轨道的相对位置可分为岛式站台和侧式站台。



图 1 北京地铁平安里站内景（丛林 摄）



图 2 北京地铁东四站内景（丛林 摄）

供电及变电所　采用直流制。国际电工委员会（IEC）规定电压标准为 600、750、1500V 3 种，中国电压标准为 750V 及 1500V；允许电压波动范围分别为 500～900V 及 1000～1800V。主要供电设备有直流牵引变电所及接触轨（也称第三轨）或接触网（见电气化铁路接触网）。

牵引变电所主要设备有整流变压器及整流器。要求变电所设备具有防水、防爆性能。为了减少谐波，普遍采用的方法是增加整流相数，采用等效 24 脉波整流接线方式。

接触轨设于地铁走行钢轨的旁边，其优点是运营维护简便、工作量少、运营费用低，但安全性较差。接触网有刚性及柔性两类，设于地铁隧道的上方，比较安全，但运营维护工作量大，费用高。中国北京地铁以采用接触轨（第三轨）供电方式居多；中国上海、广州地铁采用接触网供电方式居多。

通信信号及调度指挥等系统　地铁通信信号是提高地铁运输效率，保证安全行车的前提。信号系统由移频电气集中、调度集中、机车信号和自动停车等组成。其中调度集中就是调度员在调度室集中操纵和观察全线道岔和信号，统一指挥全线运行。通信系统包括自动电话、调度电话、车站广播等设备。

运营及检修系统　地铁列车的运营，根据客流量可以控制编组及到发时间间隔长短，调节输送客流量。如节假日或上下班客流量增加时，可增加编组或缩短到发车的间隔时间。通常其间隔时间在 1～3min 范围内，或者更长些。地铁列车的检修工作在设在地面上的车辆段进行。其检修分为厂修、架修、定修、小定检及列车检查 5 种。

地铁施工　地铁施工根据其与地面的深度，分为浅埋与深埋两种。浅埋是将一般区间隧道线路埋设在街道下面沿街道而行，通常采用明挖法施工；而深埋地铁其隧道线路采用暗挖深埋穿过建筑物的底层，采用盾构法和矿山法施工。它与浅埋明挖的施工技术相比难度较大，工料费用也高，但对地面影响甚小，适用于在繁华街道下修建地铁。

明挖法　露天开挖基坑，然后在基坑中修筑隧道的施工方法。明挖法修筑的地铁建筑物，一般采用现场整体浇筑钢筋混凝土结构。20 世纪 80 年代由于施工吊装能力的提高，有的采用预制装配式结构。明挖法修筑的隧道结构形式多为矩形断面，区间隧道多用双跨，少数用单跨，车站隧道多用三跨或双跨，隧道防水一般采用外贴卷材或喷涂材料。

暗挖法　在地下进行开挖和衬砌以修筑隧道的施工方法。暗挖法主要有盾构法和矿山法。盾构法施工的隧道断面多为圆形，衬砌材料用铸铁管片、预制钢筋混凝土管片或砌块装配而成。盾构法又发展出泥浆盾构、土压平衡盾构和刀片盾构等多种新型盾构。矿山法施工的隧道断面多为拱形，衬砌一般用钢筋混凝土整体浇筑。

地铁通过水域时，除暗挖法外，也可用围堰法、气压沉箱法和沉管法等修建地下隧道。沉管法施工安全，造价便宜，曾成功地用于旧金山地铁海湾水下隧道和香港地铁海峡水下隧道。

历史与发展　世界上第一条地铁为英国伦敦地铁。该地铁于 1863 年 1 月 10 日建成，线路长度为 6.4km，采用明挖法施工。19 世纪后期的 10 年间有芝加哥（1892 年）、布达佩斯（1896 年）、格拉朗哥（1896 年）、维也纳（1898 年）、巴黎（1900 年）等 5 座城市相继修建了地铁。其中芝加哥全部采用高架线，直到 1943 年才建成第一条地下线路。20 世纪上半叶在柏林、纽约、东京、莫斯科等 12 座城市相继修建地铁。

1969 年，中国北京地铁 1 号线建成并通车。20 世纪 80 年代末至 90 年代中期，上海地铁 1 号线、北京地铁复八线、广州地铁 1 号线相继建成。至 2012 年，中国先后有北京、天津、上海、广州、大连、长春、沈阳、深圳、重庆、南京等多个城市建成了地铁。

地铁作为解决大城市人口密集、地面交通堵塞、乘车困难、改善环保的现代化交通工具，将向着站距大、深层、小断面地铁方向发展。为充分利用地下空间，尽可能节省投资，需要解决地下深层（深度 50～60m）地铁的盾构施工方法，解决处理高水压、高土压以及到达地面距离加长等问题，解决地下立体交叉的技术难题。首先是：①安全性。深层地铁采取保证旅客安全及防火的措施尤为重要。②经济性。求得深层地铁建设、设计、施工的合理与经济效果。③舒适性。重视接送旅客、换乘条件方便以及与其他交通的衔接配合等问题。

dianbingxiang

电冰箱

电冰箱（refrigerator）　以电为动力，带有制冷系统和隔热箱体，用来冷冻、冷藏食品或其他物品的制冷器具（见家用电器）。家用电冰箱（见图 1）的容积通常为 20～500L。



图 1　双动力节能电冰箱

基本结构　由箱体、制冷系统和控制系统组成。

箱体　箱体的功能是围护隔热，使箱内外空气隔绝，以保持箱内的低温。箱体由外壳、内胆、隔热材料和箱门构成。

制冷系统　由压缩机、冷凝器、干燥过滤器、毛细管、蒸发器组成（见图 2），是一个封闭的循环系统，运转时不断吸收箱内被冷却物品的热量，并将其转移、传递给箱外的空气或水，以实现制冷。

电冰箱上使用的全封闭式压缩机有往复活塞式（简称往复式）和旋转活塞式（简称旋转式）等。往复式压缩机又分为曲柄滑管式和连杆活塞式。

冷凝器有百叶窗式、丝管式（也称钢丝式）、翅片管式和内装式（冷凝器贴附在箱体后壁或侧壁板内侧）等。

干燥过滤器使用 120～180 目的滤网，干燥剂使用 4×10^{-10} m 级分子筛或硅胶。

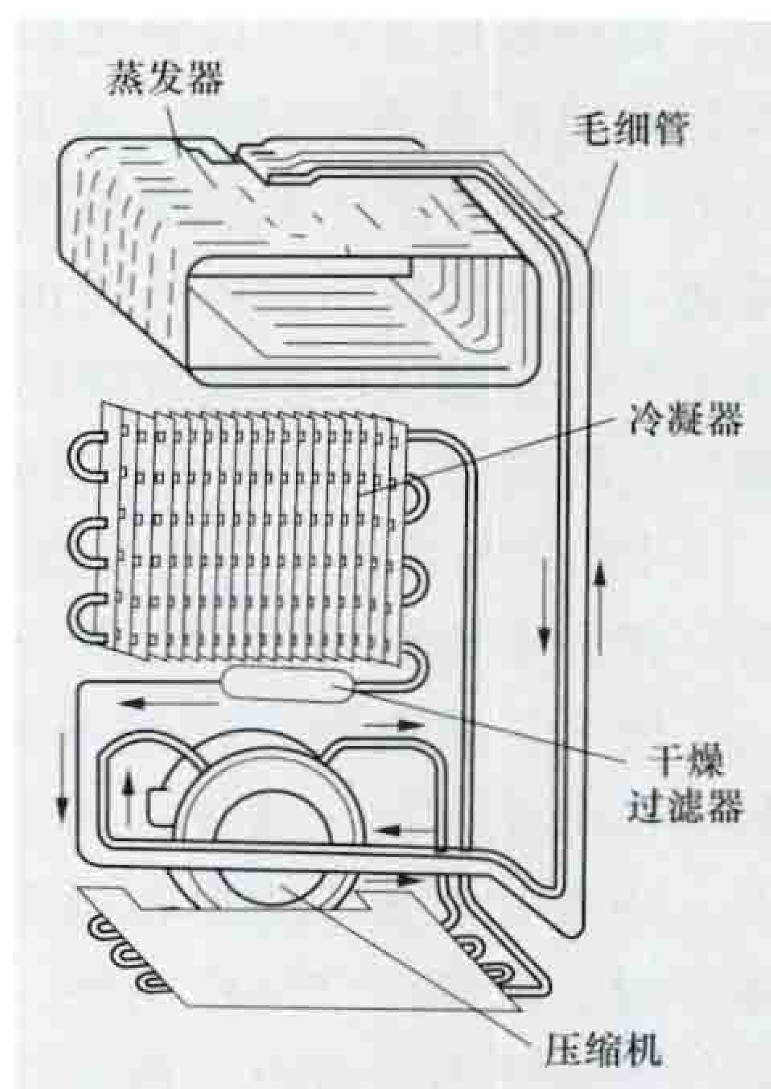


图 2　电机压缩式电冰箱制冷系统结构示意图

毛细管用内径较细的铜管制作，用来控制制冷剂的

流量，保持冷凝器与蒸发器的合理压差。

蒸发器有铝板吹胀式、铝板铝管或铜板铜管黏合的管板式、单脊翅片管式和翅片盘管式蒸发器（多在间冷式电冰箱上使用）。

控制系统　通过接通或断开电源，控制压缩机的起停，进而将箱内温度控制在设定范围内，保证电冰箱安全运转及自动除霜等。

分类　电冰箱按照制冷原理分为压缩式、吸收式、热电式等；按照箱门的多少分为单门电冰箱、双门电冰箱、多门电冰箱（有的冷冻室做成抽屉式）等；按照箱内空气循环的方式，分为空气自然循环的直接冷却式电冰箱和用风扇使空气强制循环的间接冷却式电冰箱；按照对食品的储藏方式和冷冻能力，分为冷藏箱、冷藏冷冻箱、冷冻箱；按照箱内冷冻食品的贮藏温度，分为一星级（－6℃）电冰箱、二星级（－12℃）电冰箱、三星级（－18℃）电冰箱和有冷冻能力（通常称为四星级）的电冰箱（冷藏冷冻箱）；按照在极端环境温度下的工作能力，分为亚温带型（SN，适于在10～32℃环境温度下运转）、温带型（N，适用于16～32℃）、亚热带型（ST，适用于18～38℃）和热带型（T，适用于18～43℃）；按照蒸发器的除霜方式，分为手动除霜、半自动除霜和自动除霜电冰箱等。

工作原理　电冰箱的工作原理因其制冷形式不同可分为压缩式、吸收/扩散式和热电式。

电机压缩式电冰箱　简称压缩式电冰箱。它是由压缩机、冷凝器、干燥过滤器、毛细管（节流装置）、蒸发器组成封闭的制冷系统中充入氟利昂等制冷剂，实现制冷功能。压缩机吸入在蒸发器中蒸发吸热的制冷剂蒸气，经过压缩，成为高温高压（1～2MPa）蒸气，被送往冷凝器。冷凝器向外界空气散热，使高温高压蒸气被冷凝成液态制冷剂，经过干燥过滤器滤掉混入系统中的微量杂质和水分，以防止在毛细管中发生“脏堵”或“冻堵”。然后，液态制冷剂经毛细管节流，送入蒸发器内，由于压力突然降低而激烈沸腾蒸发，同时吸收箱内被冷却物品的热量，产生制冷效果。如此循环往复，使箱内保持设定的低温。

单门压缩式电冰箱结构简单，但由蒸发器围成的冷冻空间容量较小。双门压缩式电冰箱设有独立的冷冻室和冷藏室，冷冻室容量较大，温度较低，能较长时间贮存冷冻食品。由于两个室分别开门，可以做到冷冻、冷藏的食品互不干扰，存取方便，热损失小。多门压缩式电冰箱分别设有冷冻、冷藏、蔬菜、冰温（温度为－1℃左右，且不结冰）、解冻等专用贮藏室，功能齐全，使用更为方便，并能实现食品科学的冷冻、冷藏或保鲜。

直接冷却式（直冷式）双门电冰箱结构简单、耗电量较小，冷冻室除霜方便，但箱内温度均匀性差。间接冷却式（间冷式）双门电冰箱结构（见图3）箱内温度均匀性好，可自动进行除霜，但结构较复杂，耗电量较大。多门电冰箱一般都为间接冷却式。

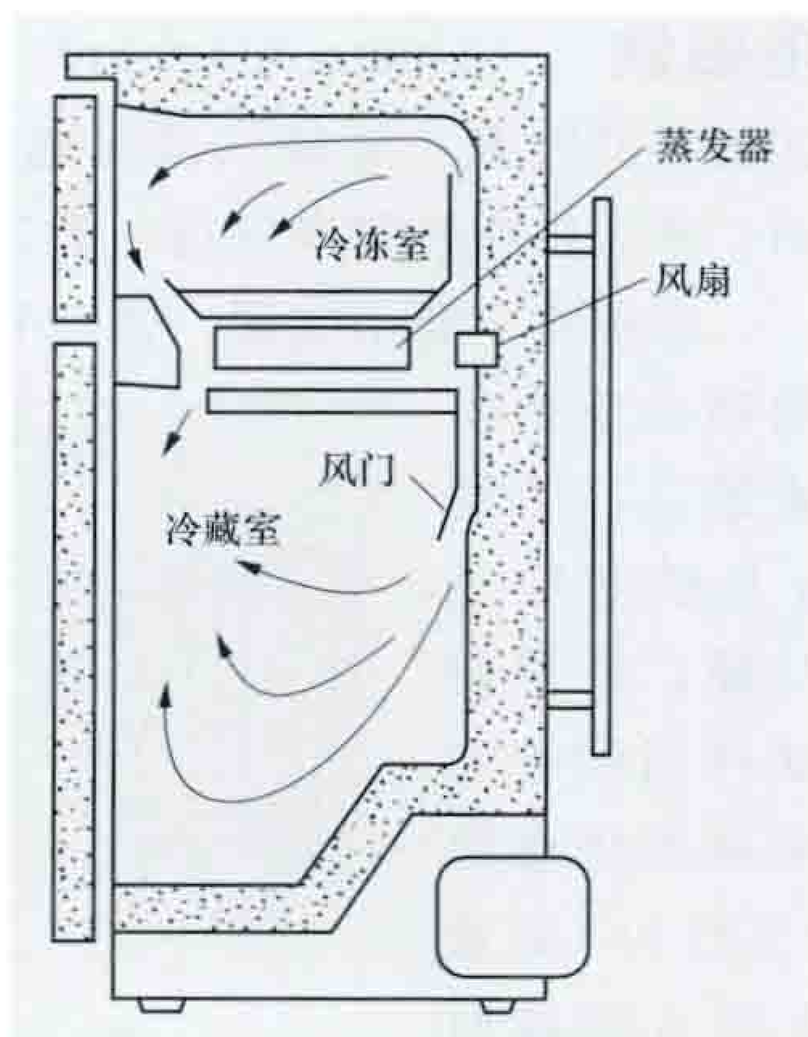


图3　间接冷却式双门电冰箱结构示意图

吸收式电冰箱　利用吸收-扩散制冷原理制成。由发生器、精馏器、冷凝器、蒸发器、吸收器、贮液罐组成封闭的制冷系统（见图4），系统中充入氨（制冷剂）、水（吸收剂）、氢（扩散剂）3种组分工质，靠工质的液位差和密度差产生自然循环实现制冷。来自贮液罐的浓氨液经液-液热交换器换热后进入发生器，发生器中的浓氨液受到加热器（电或气体加热器）加热产生气泡，由于热虹吸的作用，带气泡的氨水溶液自提升管上行，进入发生器的上部时气泡破裂，含有水蒸气和氨蒸气的混合气体进入精馏器，并在其内分馏。由于氨蒸气的冷凝温度低，水蒸气的冷凝温度高（在10^5 Pa压力下，氨蒸气在低于－33.4℃时液化，水蒸气在低于100℃时液化），所以，氨以气态进入冷凝器，水蒸气则凝成液滴返回发生器的外套管中。进入冷凝器的氨蒸气被外界空气冷却，放出热量，变为液态氨。液态氨进入蒸发器，并向着自吸收器的上方流入蒸发器的氢气中迅速蒸发扩散，吸收周围的热量，产生制冷效果。

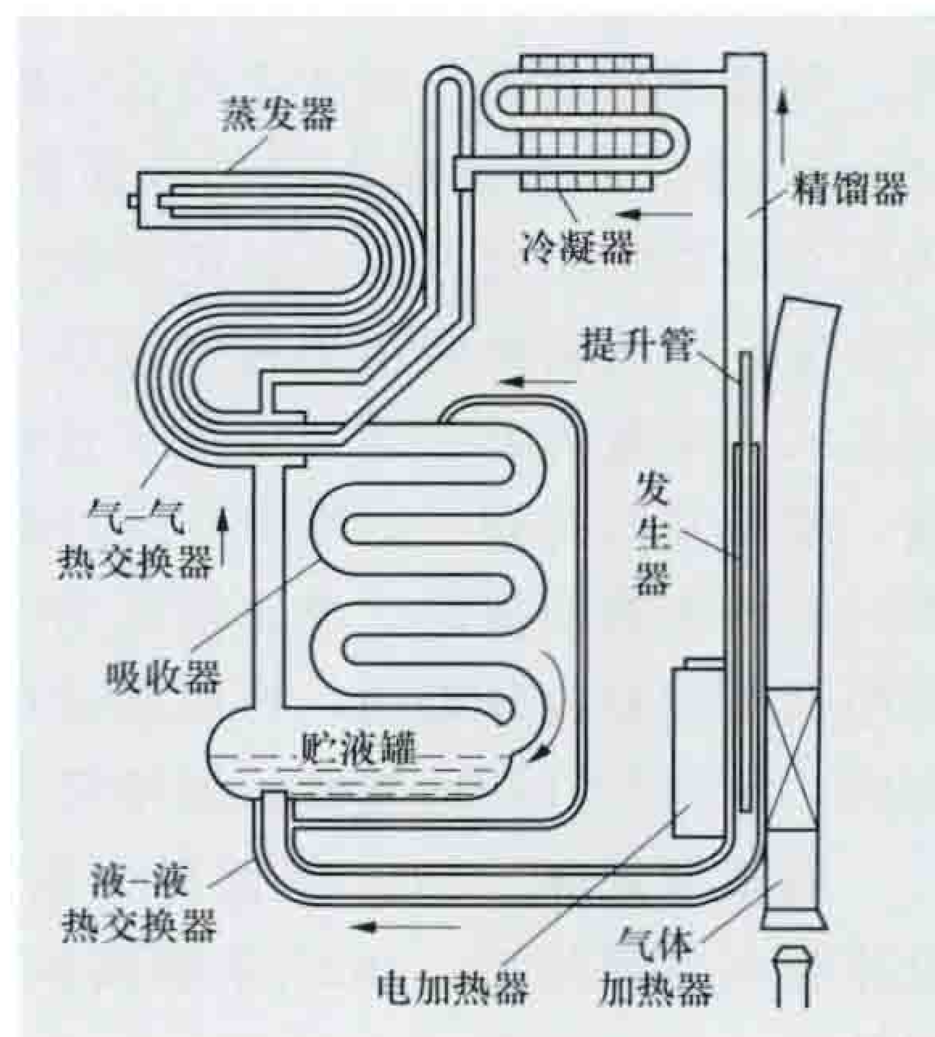


图4　吸收式电冰箱制冷系统

吸收式电冰箱系统内没有机械运转部件，无机械磨损，使用寿命长。由于运转时没有振动和噪声，特别适用于医院、卧室等需要保持安静环境的场所。这种电冰箱可以使用电、煤气、煤油、液化石油气、天然气、太阳能等多种能源制冷，因而也适用于电力不足和无电源的农村、林牧地区、边防哨卡、船舶等。吸收式电冰箱比相同功率的压缩式电冰箱的制冷量小，故首次降温速度慢，使用电能制冷时，耗电量大于压缩式冰箱。

热电式电冰箱　利用半导体材料的热电效应实现制冷。将一块P型半导体和一块N型半导体连接成电偶对，接通直流电源，在两个接头处分别形成冷端和热端。如果不断移走热端的热量，使其保持一定的温度，则冷端即开始制冷。实际应用时，要把电偶对串联或并联起来组成热电堆，热端置于箱外向周围介质（空气或水）散热，冷端置于箱内吸热，成为热电冷藏箱。

热电式电冰箱无机械运动部件，使用时没有振动和噪声，寿命长，维修简便。这种电冰箱不用制冷剂，没有污染，调节工作电流的大小即可改变电冰箱的冷却速度和制冷温度。这种电冰箱体积可以做得很小，但由于制冷效率低、半导体材料昂贵，发展受到限制。

选购注意事项　选购电冰箱时应注意：①外形轮廓清晰，造型美观，色调柔和舒适，表面无划痕，电镀件光泽明亮。②3～5口人的家庭可选购180～280L的双门电冰箱，其冷冻室容积约占一半，可以满足贮存冷冻食品的需要。已经购置了单门电冰箱的用户，如果想增加冷冻室容积，可以

再添置一台100L左右的冷冻箱。多开门大容积冰箱已经进入家庭，可提供多个不同温区的间室，用于存放不同的食品。③电冰箱内胆不应有裂痕或凹瘪，用手轻轻拍打，不能有不实的“啪啪”声。门封四周应平直，四角无凹凸不平或裂缝。箱门临关闭前，应在磁性门封的吸力下自动关闭。④接通电源，听一听电冰箱运行时噪声和振动的大小，并按说明书进行适当调整。转动温度控制器旋钮，应灵活自如。

使用与维护 电冰箱应放在室内避开日晒、远离热源、通风良好的地方，同时应进行水平调整，以利电动机稳定工作。背挂式冷凝器（钢丝式或百叶窗式）与墙壁的距离应在10cm以上。热食物应在箱外冷却到室温后再放入箱内。箱内贮存的食物不宜过满，以免影响冷气对流。放入冷冻室进行冷冻贮存的食物应用塑料袋包好，或放在器皿内。蔬菜水果放入果菜盒内贮存前，应擦干表面水分。尽量减少开门次数，缩短开门时间，以减少冷气外逸，节省电能。搬运电冰箱时不可倒置或横放。电冰箱长期停用时，应用软布蘸中性洗净剂擦洗箱内外表面，再用软细布擦干，放在干燥通风的室内，箱门常打开通通风，保持箱内干燥。

沿革与发展 1910年世界上第一台压缩式制冷的家用电冰箱在美国问世。1925年瑞典伊莱克斯（Electrolux）公司开发了家用吸收式电冰箱。1927年美国通用电气公司研制成功全封闭压缩式制冷装置。1931年研制成功新型制冷剂CFC12，并在工业上使用。20世纪50年代后半期开始生产家用热电式电冰箱。

中国从20世纪50年代开始生产电冰箱。1952年，沈阳医疗器械厂制成中国第一台装有开启式压缩机的电冰箱。1956年天津医疗器械厂试制成功中国第一台全封闭压缩式电冰箱。

压缩式电冰箱的发展趋势是对环境无污染、大容积、多功能、多种箱温、抗菌保健、食品保鲜、节能、应用微电子技术。

电冰箱中使用的制冷剂R12和发泡剂R11是对臭氧层产生破坏作用的氯氟化碳类物质，为此，替代R12和R11工质是世界各国对于制冷剂研究的主要方向。同时，要大幅度降低电冰箱能耗，以减少火电厂温室效应气体CO_2的排放。

dianci jiaoban

电磁搅拌

(electromagnetic stirring) 由电磁力引起的金属熔液的运动。位于交变电磁场中的金属熔液内部会产生感应电流，该电流与磁场作用产生电磁力，促使金属熔液流动。在空间有限的区域，如熔炼炉内，这样的流动会使金属熔液得到搅拌。电磁搅拌能促使金属熔液的温度和合金成分均匀。

许多种熔炼炉内存在由其自身电磁场所引起的电磁搅拌。多数熔炼炉，其自身的电磁搅拌足以满足冶金要求。少数熔炼炉，如工频坩埚式感应熔炼炉，其自身的电磁搅拌过强，须采取措施加以抑制。但对某些熔炼炉和冶金设备，由于自身搅拌不足，为加强搅拌，可配备专用的电磁搅拌设备。

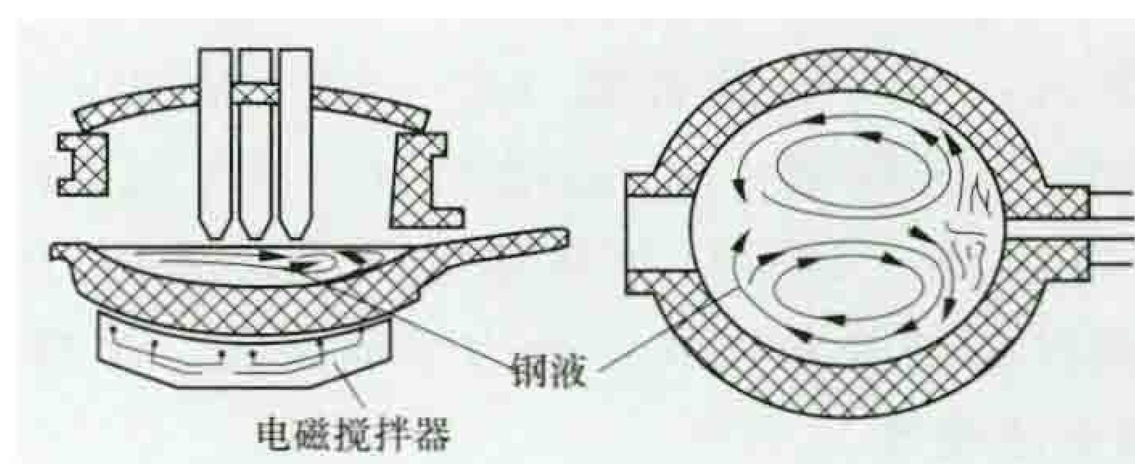
电磁搅拌设备投资大，功率因数和效率都很低（如用于炼钢电弧炉时，其功率因数和效率分别为0.5和0.05），限制了它的应用。

电磁搅拌设备主要由电源和电磁搅拌器两大部分组成。为了使交变电磁场能深入金属熔液的内部，所用电源主要是两相晶闸管变频电源。电源频率一般在10Hz以下，金属熔液层愈厚，电源频率愈低。有时，也用两相或三相工频电源。

电磁搅拌器的结构形式很多，大体上可分旋转磁场搅拌器、移动磁场搅拌器和垂直搅拌器3种。

旋转磁场搅拌器类似感应电动机的定子，呈中空圆柱形，有铁芯和两相或三相绕组。当把这样的搅拌器套在金属熔液容器（如连续铸钢生产线中连铸机的水冷铜结晶器）外面并通上电，则搅拌器内表面上会产生一个旋转磁场。这个磁场作用于金属熔液，使之像电动机转子那样跟着旋转，得到旋转搅拌。该搅拌器主要用在连铸机上。

移动磁场搅拌器用来产生移动磁场，使金属熔液得到移动搅拌。这是一类适用面最广的电磁搅拌器。其结构形式与定子相似，但把定子一侧沿轴向切断后展开，这时旋转磁场转变成为移动磁场。按定子展开和其结构形状改变的程度，可分为舟形、板形、瓦形、筒形等几种。舟形搅拌器形似部分展开的定子，主要用于炼钢电弧炉，见图。搅拌器内面紧贴在炼钢电弧炉的炉底上（炉底钢板要用非磁性钢，以便磁场能透入炉内）。磁场移动方向在出钢口和出渣口的连线上。两相绕组通电后，移动磁场将使金属熔液得到搅拌。两相绕组的电流相序可互换，以便出渣时把熔渣汇集到出渣口附近。板形搅拌器类似完全展平的定子，其作用原理与直线电动机相同，用于生产板坯的连铸机上。瓦形搅拌器是板形的变形，用于生产圆坯的连铸机和带电磁搅拌设备的钢包精炼炉（搅拌器位于钢包外侧），可使金属熔液得到单方向搅拌。



炼钢电弧炉电磁搅拌示意图

垂直搅拌器与无心感应熔炼炉的单相感应器类似。垂直于搅拌器中轴线的电磁力会驱使金属熔液分上下两段分别搅拌。这种搅拌器用于连铸机上的某些部位。

还有其他类型的搅拌器，如把旋转搅拌和移动搅拌结合在一起的螺旋磁场搅拌器等。用于真空电弧炉的稳弧线圈，同时也可以起到使结晶器熔池中金属熔液得到旋转搅拌的作用。

diancitie

电磁铁

(electromagnet) 利用电流来产生并保持其磁场的装置。电磁铁能将电磁能转变为机械能，用来操动、牵引机械装置和起重、搬运、装卸铁磁性物体。

电磁铁主要由线圈、铁芯和可动的衔铁组成。线圈中的励磁电流产生磁通ϕ，磁通ϕ从铁芯穿过气隙，经过衔铁再回到铁芯形成封闭磁路（见图1）。磁通ϕ穿入衔铁时对衔铁产生电磁吸力，将衔

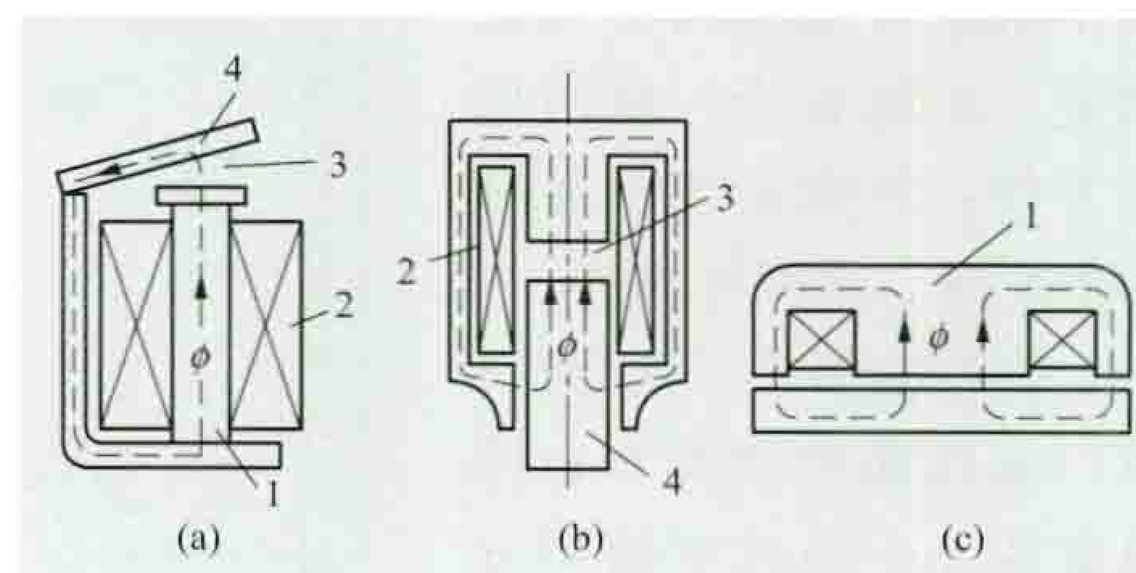


图1 电磁铁的工作原理

(a) 拍合式；(b) 螺管式；(c) 盘式

1—铁芯；2—线圈；3—气隙；4—衔铁

铁吸向铁芯，可动的衔铁带动机械负载做功。对于交流电磁铁，由于线圈通以交流电流，它所产生的磁通 ϕ 随时间而变化，其产生的吸力也是随时间变化的，因此会产生铁芯的撞击和很大的噪声。为了免除噪声，交流电磁铁的铁芯端面上装有分磁环，将穿过气隙的磁通分成两部分，如图 2 所示的 ϕ_1 与 ϕ_2。由于分磁环是一个 1 匝的短路线圈，它有一定的阻抗，使得磁通 ϕ_1 与 ϕ_2 的相位不同，磁通 ϕ_1 产生吸力的过零时刻与磁通 ϕ_2 产生吸力的过零时刻在相位上错开，使合成的吸力不会降低到零，减少了铁芯的撞击，从而降低了噪声。

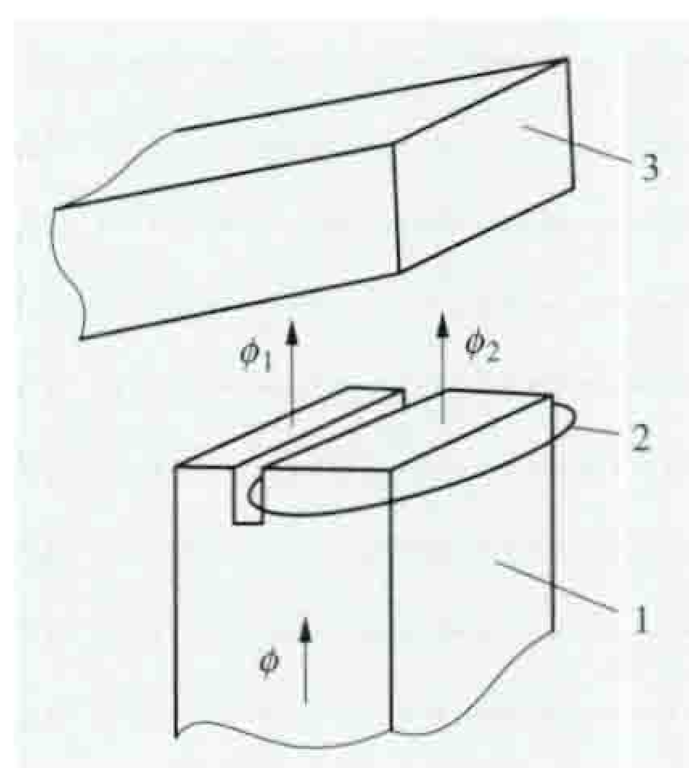


图 2　单相交流电磁铁铁芯端面上的分磁环
1—铁芯；2—分磁环；3—衔铁

电磁铁按结构分为拍合式、螺管式和盘式电磁铁等；按动作方式分为直动式、转动式电磁铁；按电流性质分为直流电磁铁和交流电磁铁，交流电磁铁又分为单相交流电磁铁和三相交流电磁铁；按用途可分为牵引电磁铁、制动电磁铁、起重电磁铁和阀用电磁铁等。此外，属于电磁铁类的还有用以传递或隔断两轴间的机械联系的电磁联轴器，用在机床工作台上以吸牢磁性材料工件的电磁吸盘，供高能物理、核聚变研究、磁流体发电和高速悬浮列车等方面使用的、能产生高达数十特（斯拉）的磁通密度而几乎不消耗线圈功率的超导电磁铁等。

牵引电磁铁　牵引机械装置中用的电磁铁，如用于机床及自动控制系统中的电磁操动机械。根据其工作行程的长短分为长行程牵引电磁铁和短行程牵引电磁铁，行程长时多采用螺管式。

制动电磁铁　操动制动器作机械制动用的电磁铁。如电磁吸力通过液压传递给制动机构作为驱动力的电磁铁，称为液压制动电磁铁。

起重电磁铁　搬运或装卸铁磁性物件的电磁铁，主要用于冶金、铸造、机械制造及运输等部门，起重和搬运钢材、钢锭及废旧钢铁等铁磁性物件，一般采用盘式结构。其特点是磁极面积较大，磁路较短，故能获得很大的吸力。

阀用电磁铁　供远距离操作各种液压、气动系统阀门的电磁铁。阀用电磁铁不设复位装置，而由阀体中的弹簧使之复位。当电磁铁的励磁线圈通过电流时，电磁吸力即克服弹簧阻力，使阀体的推杆移动，将阀门开启；当励磁线圈断电后，在复位弹簧作用下，阀体推杆便推动衔铁，使其移动至额定行程处，阀门关闭。阀用电磁铁分为湿式和干式两种。湿式阀用电磁铁的衔铁在液压油中工作，由于油的冷却作用，使其与具有相同吸力的电磁铁相比，有较小的尺寸。

diancizao

电磁灶

电磁灶　（induction cooker）　利用感应加热原理，使金属锅体底部在交变磁场中产生涡流，形成热量，以烹饪食物的厨房电烹饪家用电器，又称电磁炉。按感应电流频率可分为低频（50Hz 或 60Hz）电磁灶和高频（1500Hz 以上）电磁灶两种，其功率可调。

结构与原理　电磁灶（见图 1）主要由壳体、灶面板、电磁线圈（也称感应线圈或加热线圈）、控制电路、冷却风扇等组成。加热部分包括烹饪容器、灶面板、电磁线圈、励磁铁芯等，如图 2 所示。壳体是电磁灶的骨架和电气防护层，由工程塑料制成。灶面板由陶瓷质材料制成，可让磁力线通过并支撑着烹饪容器。电磁线圈及其电路是电磁灶的核心，当电磁灶接入电源后，可产生交变磁场而感应出电流。控制电路用于对电磁灶工作状态的控制，包括对电磁灶的设置和调节。冷却风扇的作用是对电磁线圈及其电路在工作中所散发的热量进行冷却。



图 1　电磁灶

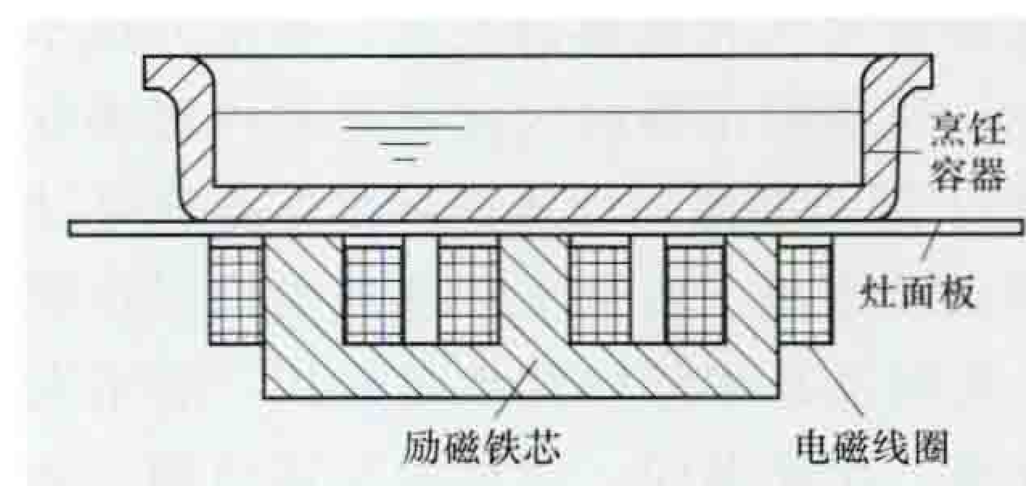


图 2　电磁灶加热部分结构

电磁灶控制原理如图 3 所示。交流电源经整流后，向逆变电路供电并产生高频振荡电流，这个电流经过电磁线圈后，产生交变磁场并穿过灶面板进入烹饪容器底部和边壁，交变的磁力线在烹饪容器的底部和边壁形成“涡流”感应电流，涡流克服烹饪容器材料的电阻，便产生热量，从而加热烹饪容器。

当负荷（烹饪容器）大小变化时，逆变电路将引起电磁线圈阻抗变化并反馈到控制电路，控制电路按照不同负荷对逆变电路进行连续调节，达到自动控温的目的。当负荷超载时，过载开关动作，切断电源，继电器触点打开，电气装置各元件停止工作。

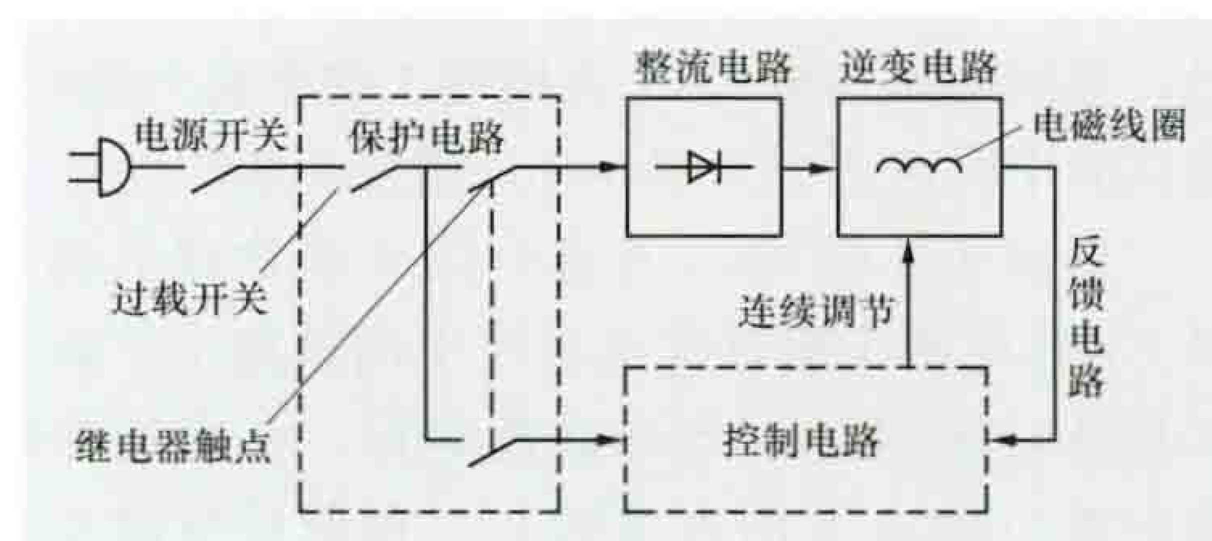


图 3　电磁灶控制原理

电磁灶必须与铁磁性材料制成的烹饪容器配合才能正常工作，常见的铸铁锅和碳素钢材质的铁锅可以在电磁灶上使用，而单纯的铝质锅和不锈钢质锅则不能使用。当使用的烹饪容器材质和大小适宜时（与灶面板提示的区域吻合），电磁线圈发出的磁力线（电磁场）绝大部分都会与烹饪容器交汇，其携带的能量绝大部分转化成电能进而变成热能。只有当上述条件不具备时，才会有一部分磁力线发散到空间（称为漏磁），人体若长期处在这样的磁场中可能会有副作用，因此消费者必须注意正确选用烹饪容器（材质和大小）。

沿革与发展　20 世纪 20 年代已有将电磁感应加热原理用于烹饪的专利，但未付诸实用。1972 年，美国西屋（Westing House）电气公司将世界上第一台电磁灶投放市场。1973 年，日本的电磁灶开始商品化。20 世纪末电磁灶已是常用的烹饪电器。中国在 20 世纪 80 年代开始生产电磁灶，已经成为电磁灶的生产大国，“多眼”电磁灶、嵌入式电磁灶、带有其他加热方式的组合式电磁灶以及迎合中餐爆

炒习惯的凹型灶面电磁灶将是其发展的主流趋势。

diandongchezu

电动车组 (motor train unit)

由若干辆动车或动车加拖车组成相对固定的单元列车编组。它一般多用于旅客运输。动车是指带有动力的车辆，而拖车则为不带动力的车辆，两者共同组成电动车组。电动车组按供电电流制式分为直流、交流和多流制3种；按传动方式则有直流传动和交流传动之分；如按受电方式又可分为架空接触网供电和第三轨供电等方式。

电动车组与电力机车在供电调速等方面没有本质差别，只是电动车组在动力分布上一般比较分散。

简史 电动车组是随着电气化铁路的发展，在电力机车之后产生的。20世纪初，英国的市郊电气化铁路采用两端各有一辆440kW的动车和中间两辆拖车组成的最早的直流电动车组。30年代前后，柴油动车组（由车上柴油发电机组作能源）发展很快，欧洲、美洲及日本等曾经大量采用，后来发展到大洋洲、亚洲和非洲。在此期间，动车的车体结构、动力传动系统、走行转向架结构以及运行性能和舒适度（振动和噪声）等方面均有较大改进。柴油动车组柴油机功率为800kW，最大运行速度达140km/h。50年代电动车组最大运行速度发展到160～180km/h。1964年10月，日本东海道新干线（东京—大阪）建成，成为世界上第一条高速电气化铁路，电动车组最大运行速度达210km/h。法国TGV高速电动车组为动力集中式电动车组，该车组由两端各一辆动车，中间8辆拖车组成，全部电动车组功率为6300kW。2007年4月，法国高速列车TGV在刚竣工的巴黎—斯特拉斯堡东线铁路试验中时速达574.8km/h，创造了新的世界纪录。

中国于2007年4月进行第6次铁路大面积提速，和谐号CRH电动车组首次出现在中国铁路上，在既有线上实现了最高时速250km/h的高速运行，在客运专线上实现了最高时速300km/h的高速运行。和谐号电动车组具有牵引功率大、轴重小、起动加速性能好、可靠性高、车辆空间利用率高等特点。CRH电动车组采用流线型外形，具有优良的空气动力学性能；牵引系统采用了大功率交-直-交牵引传动方式，交流模块采用小体积、大功率IGBT/IPM元器件，具有起动平稳、有效抑制空转和滑行、驱动简单、保护容易、开关频率高等特点；制动系统采用微机控制电-空复合制动方式，能够按照制动模式控制曲线实现平稳、准确调速和停车，充分发挥再生制动的节能作用。

编组 电动车组采用以单元为基本要素的编组方式，不同的电动车组有不同的编组规定，有时编组也可根据不同区段的运营要求和客流变化情况进行调整。如一辆动车和一辆拖车为一单元，每单元有一个受电弓，一列电动车组可由两个或数个单元组成。也有的电动车组为固定编组，不能随意编组，一般为两辆动车各带一个司机室分列在两端，拖车在中间，铰接式车体，转向架布置在两个车体连接处，跨于两个车体之间。

diandongji

电动机 (motor)

利用电磁感应原理运行的旋转电磁机械，用于将电能转换为机械能。运行时从用电系统吸收电功率，向机械系统输出机械功率。它能带动机械做旋转、角位移或直线运行。

现代化生产中，多数生产机械都采用电动机作为原动机。电动机（见图1）的种类和规格多，功率范围大，使用和控制非常方便，具有自起动、调速和制动等能力，能满足各种运行要求，工作效率也比较高。由于它有一系列优点，所以在工农业生产、交通运输以及人们的日常生活中得到了广泛的应用。



图1 电动机

随着电子技术和计算机技术的发展以及现代控制理论的应用，控制电机广泛地应用于运动控制系统（对位置、速度、加速度、力或力矩进行精确控制的系统）和解算系统，并在运动控制系统中作执行元件、检测元件、反馈元件、变换元件，在解算系统中作解算元件。控制电机过去称控制微电机，但随着控制系统的功率和使用范围的扩大，不论是军用控制系统还是民用控制系统中使用的电机，从功率、质量、体积方面都早已超出“微”的范围。

发展简史 1821年，英国物理学家M.法拉第（Michael Faraday，1791—1867）演示了通电流的导线环绕磁铁旋转的现象，这种电磁旋转装置可以认为是直流电动机的雏形。1821～1825年间，法国科学家A.M.安培（A.M.Ampere，1775—1836）推导了电动力公式，得出安

培环路定律，奠定了电动力学的基础。1823～1825年，英国人P. 巴洛（Peter Barlow）、W. 斯特金（William Sturgeon）和美国人J. 亨利（Joseph Henry）分别制作了电磁铁，证实了电磁作用可以产生吸引力。1831年M. 法拉第在总结试验的基础上，提出了著名的法拉第电磁感应定律。这一定律将磁的现象与电的现象联系起来，奠定了机电能量转换的理论基础。后来他又利用电磁感应发明了世界上第一台真正意义上的电机——法拉第圆盘发电机。同年，J. 亨利对法拉第的电机模型进行了改进，制作了一个简单的振荡电动机。1832年，W. 斯特金发明了换向器，据此对J. 亨利的振荡电动机进行了改进，并制作了世界上第一台能产生连续运动的旋转电动机。后来他还制作了一台并励直流电动机。1834年，美国人T. 达文波特（Thomas Davenport，1802—1851）在J. 亨利的支持下制成一台直流电动机，并于次年用它驱动一辆小车。1838年，俄国人Б.С. 雅科比（Борис Семёнович Якоби，1801—1874）设计并制造了一台直流电动机，用它驱动一条小船在彼得堡的涅瓦河上航行了一段，初步显示了电动机的实用性。同年，俄国人Э.Х. 楞次（Эмилий Христианович Ленц，1804—1865）最早提出一台电机既可作为发电机又可作为电动机运转的可逆性原理。1845年，英国物理学家C. 惠斯通（Charle Wheatstone，1802—1875）用电磁铁代替永久磁铁，这是增强电机输出功率的一个重要措施。1859年意大利人A. 帕奇诺蒂（Antoni Pacinoti，1841—1912）发明环形电枢，并制成电动机，构成了现代电动机原型。1873年比利时人Z.T. 格拉姆（Z.T. Gramme，1826—1901）和法国人E. 方丹制作了两台电机，在维也纳国际博览会上用蒸汽机驱动其中一台大的电机发电，向1km外的另一台电机供电，成功地驱动了水泵。最初的直流电动机是由电池供电，以后由直流发电机供电，这就导致了公用供电系统的出现。1874年俄国人Ф.А. 皮罗茨基（Федор Аполлович Пироцкий，1845—1898）进行了3.6km的直流输电试验，发现电压降落和电能损耗太大，低压直流电输送距离不长，最多只有几千米，不能满足工业需要，难以推广应用。1880年和1881年，俄国人Д.А. 拉契诺夫和法国人M. 德普勒（Marcel Deprez，1843—1918）分别提出用高压直流输电以减少损耗。1882年M. 德普勒建立了世界上第一条远距离直流输电线路，长57km、电压1.5～2kV。试验表明，当时产生高压直流电有困难，而且用户使用过高的电压也很不方便，于是19世纪80年代人们转而研究发展交流电。1881年美籍发明家N. 特斯拉（Nikola Tesla，1856—1943，见图2）发现旋转磁场原理，并于1883年制成两相感应电动机。1885年意大利人G. 费拉里斯（G. Ferraris，1847—1897）提出交流电机的旋转磁场理论，这是交流电机理论的重要发展。他还制造了一台3W的两相交流电动机。与此同时，N. 特斯拉也提出了依靠旋转磁场工作的感应电动机，并于1886年制成了感应电动机。1888年俄国人M.O. 多利沃-多布罗沃利斯基（Михаил Осипович Доливо-Добровольский，1861—1918）提出三相制并于1889年制成了实用的三相笼型感应电动机，这种电动机结构简单、坚固、成本低，很快便得到广泛应用。同年他又发明了同步电动机。1890年美国西屋电气公司利用N. 特斯拉的专利制成了第一台能自起动的同步电动机。同年，N. 特斯拉提出了单相电动机的分相起动法，美国人E. 汤姆逊（Elihu Thomson，1853—1937）又发明了罩极电动机。1891年8月25日，世界上第一条三相交流远距离输电线路由劳芬至法兰克福投入运行。三相感应电动机和三相制的出现，奠定了交流电动机在工业上应用的基础。1893年美国西屋电气公司开始成批生产异步电动机产品供工业应用。从19世纪末到20世纪初，各种电动机的形式均已基本具备。


图2　N. 特斯拉

20世纪初以来，人们在降低电动机成本、减小尺寸、提高性能、采用新材料、改进电动机设计和生产工艺等方面做了大量工作，使电动机在品种、规格、容量、产量各方面都有了很大的发展。50年代，随着计算机技术和电子技术等的发展，电动机出现了更多新品种，并具有了很好的性能。80年代，美国开发了以微机为基础的新型控制器，在电压波动、负荷变动时能使电动机获得最高效率。现代电动机产品种类繁多，应用极广。

中国最早的电机、电器修理工场是钱镛记电器铺，创办于1914年；最早的制造厂是华生电器制造厂，创办于1916年；最早的官办电机厂是国民政府建设委员会电机制造厂，创建于1927年。这些生产厂都设在上海。

1949年以后，中国的电机制造业经历了从修配到制造，从仿制到自行开发的发展过程。首先参照美国西屋电气公司的技术资料，设计、试制、生产了中小型异步电动机系列（包括起重、冶金电动机系列）。其后，中小型电动机主要产品经历了三次全国统一设计。

1952年12月～1953年7月在哈尔滨组织进行了第一次全国电机统一设计。设计采用了苏联电机基本标准ГОСТ183-41以及其他有关标准，设计参数和计算程序采用经过消化和生产实践验证的美国西屋电气公司技术资料。第一次全国统一设计的J、JO、Z系列使中国中小型电动机产品达到20世纪40年代的国际水平。

1958年开始进行第二次全国电机统一设计。参照苏联A2、AO2系列小型异步电动机的技术设计资料进行J2、JO2系列统一设计；参照苏联П系列小型直流电动机设计资料进行Z2系列统一设计；参照苏联A、AK系列中型异步电动机资料进行100～1000kW新系列设计。1960年，J2和JO2系列电动机通过鉴定，但由于当时选用的E级绝缘材料不落实，部分规格温升未过关，没有全面推广。1962年开始进行J2、JO2系列电动机调整设计。同年，Z2系列直流电动机也开始进行调整设计工作。

第三次全国电动机统一设计开始于1979年4月。1982年4月通过小批试制鉴定定型，全面推广。Y系列（IP44）小型异步电动机与JO2系列电动机相比，硅钢片节约9%，但用铜量增加4.6%，体积缩小15%，质量减轻12%，产品加权平均效率提高0.41%，起动转矩提高，且保证了较好的振动和噪声水平，其主要性能达到或接近世界上同类产品80年代初的先进水平。1985年，Y系列（IP23）、YR系列以及YB系列隔爆型电动机、电磁制动电动机、深井泵用电

动机、户外及防腐蚀电动机、调磁调速电动机等18个派生系列均通过鉴定。Y系列电动机是在对引进美国西屋电气公司、瑞士BBC公司的技术消化吸收的基础上，于90年代初完成系列设计并投入生产。它采用了箱式结构，可派生多种防护形式，效率提高了2个百分点，电动机材料用量明显下降。直流电动机方面，1982年在引进联邦德国AEG公司R4系列小型直流电动机技术的基础上，开发生产了Z4系列小型直流电动机，它与Z2系列直流电动机相比，相同中心线高的输出功率增加近10倍，转动惯量降低47%。采用全叠片的磁路结构，能适应电枢电流的快速变化，大大地改善了换向性能。

1993年5月又开始了Y2系列电动机的全国统一设计。电动机采用F级绝缘，温升按B级考核，提高了电动机的可靠性。通过对结构的改进，使电动机的防护等级提高到IP54。在电磁、结构和制造工艺上采取了多种措施，使电动机的噪声和振动得到了有效控制，Y2系列电动机除考核空载噪声外，还对不同极数电动机分别规定了负载噪声高出空载噪声的限值。为了改善电动机的外观质量，机座散热片采用平行垂直分布的结构取代长期沿用的辐射形分布的结构。1992年美国公布能源政策法规规定，大部分一般用途的连续定额的笼型异步电动机在1997年10月24日以后只能生产高效率电动机。90年代末，中国已开发出符合美国电气制造商协会（NEMA）标准的高效率电动机，进入了美国市场。

中国生产的各种交、直流电动机已能满足国内大型轧钢设备、高炉设备、电站设备、采矿勘探设备以及化工、水泥、造纸、机床等各方面的需要。中、小型电动机及微电动机相关企业超过3000家，相关产品已出口到60多个国家或地区。图3所示为高压异步电动机，图4所示为给水泵电动机。



图3 高压异步电动机

分类 电动机可以按功率大小、用途、电源类别、机壳防护结构形式、通风冷却方式、安装结构及安装形式、转速变化、电压高低、工作制类型和运动形式等分类。

按功率大小分类 分为大型、中小型和小功率电动机。因额定转速和铁芯长度的差别，同一直径的电动机容量将在一个很宽的范围内变化，因此，就容量而言，大型、中小型和小功率电动机不可能有一个明确的界限。

大型电动机一般是指定子铁芯外径大于1000mm或电动机轴的中心线高在630mm以上的交流电动机和转子铁芯外径大于1000mm的直流电动机。由于历史的原因，把转子铁芯外径大于423mm，或电动机轴的中心线高在355mm



图4 给水泵电动机

以上的中型直流电动机也划入了大型电动机的范围。

中小型电动机一般是指电动机轴的中心线高为80～630mm的交流电动机和中心线高为80～355mm的直流电动机。

小功率电动机指折算至50Hz、1500r/min下的连续额定功率不大于1.1kW的电动机。

按用途分类 分为一般用途、规定用途和特殊用途三类电动机。此外，应用于运动控制系统和解算系统的电机称控制电机。

一般用途电动机是按标准设计的、运行特性和机械结构适用于一般运行条件，而不限于某一特定用途或某一类型用途的电动机。

规定用途电动机是按标准设计的、运行特性或机械结构或者两方面均适用于某一特定用途或某一类型用途的电动机。

特殊用途电动机是为某一特殊用途设计的、具有特殊运行特性或特殊机械结构或两者兼备的电动机。

按电源类别分类 分为直流、交流和交直流两用电动机。

直流电动机是依靠直流电源运行的电动机。按励磁方式可分为他励、并励、串励和复励4种。如用永磁体励磁，则称为永磁直流电动机。

交流电动机是依靠交流电源运行的电动机，主要有同步电动机、感应电动机两大类，每类又有单相和多相之分。

交直流两用电动机又称普用电动机，是既可用直流电源供电，也可用单相工频交流电源供电的电动机。

按机壳防护结构形式分类 分为开启式、封闭式、密封式、充压式、气密式和罐封式电动机。

开启式电动机是具有通风孔，直接从周围介质吸入冷却介质进行冷却，然后直接排放到周围介质的电动机。

封闭式电动机在冷却过程中周围介质不进入机壳。

密封式电动机具有专门的密封措施，在正常运行时，可使电动机内部冷却介质的外泄量或周围介质的渗入量极少。

充压式电动机的内部冷却介质压力高于周围介质压力。

气密式电动机在规定条件下指定的蒸气或气体进入电动机内并不影响其正常运行。

罐封式电动机采用金属密封层完全密封电动机的指定部分，以防止液体进入。

按通风冷却方式分类 分为自冷式、自扇冷式、他扇冷式和管道通风式电动机。

自冷式电动机多为 1kW 以下的小功率电动机。电动机产生热量不多，不安装风扇，仅依靠空气的自然流动使机壳表面获得冷却。

自扇冷式电动机由安装在电动机转轴上的风扇供给冷却空气，以冷却电动机表面或内部。

他扇冷式电动机中供给电动机冷却空气的风扇不是由电动机驱动，而是独立驱动。

管道通风式电动机的冷却空气不是由电动机外部直接进入或由电动机直接排出，而是通过管道引入或排出电动机。管道与电动机进出风口的连接可以是仅与进风口或出风口连接，或者与进、出风口连接。管道通风式电动机可以是自扇冷式或他扇冷式。

按安装结构及安装形式分类　按安装结构，分为用底脚安装、用凸缘安装以及用底脚和凸缘安装 3 种。按安装形式，又可分为卧式安装、立式安装以及轴伸向上或向下安装。

按转速变化分类　分为恒速、变速、多速和调速 4 类电动机。

恒速电动机在正常负载范围内，转速保持恒定或基本保持恒定的电动机。如同步电动机、小转差率的感应电动机。

变速电动机在正常负载范围内，转速有明显变化的电动机，通常随负载增加转速下降，如串励直流电动机。

多速电动机在指定负载下可按两级或多级规定转速中任一级转速运行，如变极感应电动机。

调速电动机在指定负载下，转速可以在规定范围内调节到任意数值，如用磁场变阻器在一定范围内调速的并励直流电动机。

按电压高低分类　分为高压电动机和低压电动机。电压在 3kV 及以上的为高压电动机，在 3kV 以下的为低压电动机。

按工作制类型分类　有连续、短时、周期和非周期工作制等 10 类电动机。中国国家标准将电动机工作制类型分为 10 类，即 S1～S10，见表 1。

表 1　电动机工作制类型

工作制类型	代号	选用原则
连续工作制	S1	在恒定负载下连续运行时间足以达到热稳定
短时工作制	S2	在恒定负载下按给定的时间运行，电动机在该时间内不足以达到热稳定，随之停机和断能，其时间足以使电动机再度冷却到与冷却介质温度之差在 2K 以内
断续周期工作制	S3	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段停机和断能时间。这种工作制中每一周期的起动电流不致对温升产生显著影响
包括起动的断续周期工作制	S4	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段对温升有显著影响的起动时间、一段恒定负载运行时间和一段停机和断能时间
包括电制动的断续周期工作制	S5	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段起动时间、一段恒定负载运行时间、一段快速电制动时间和一段停机和断能时间
连续周期工作制	S6	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段恒定负载运行时间和一段空载运行时间，但无停机和断能时间
包括电制动的连续周期工作制	S7	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段起动时间、一段恒定负载运行时间和一段电制动时间，但无停机和断能时间
包括负载-转速相应变化的连续周期工作制	S8	按一系列相同的工作周期运行，每一周期包括一段在预定转速下的恒定负载运行时间和一段（或几段）在不同转速下的其他恒定负载运行时间（例如变极多速异步电动机），但无停机和断能时间
负载和转速非周期变化工作制	S9	负载和转速在允许的范围内变化的非周期工作制。这种工作制包括经常过载，其值可远远超过满载
离散恒定负载工作制	S10	包括不多于 4 种离散负载值（或等效负载）工作制，每一种负载的运行时间足以使电动机达到热稳定，在一个工作周期中的最小负载值可为零（空载或停机和断能）

按运动形式分类　有旋转电动机和直线电动机。旋转电动机具有能做相对旋转运动的部件，直线电动机具有能做相对直线运动的部件。

基本工作原理　载流导体在磁场中受到的电磁力 F，其大小为

$$F=Bli$$

式中 B 为磁通密度，T 或 Wb/m^2；l 为导体长度，m；i 为电流，A；F 为电磁力，N。

电磁力、磁场和电流三者的方向互相垂直，用左手定则确定，如图 5 所示。当磁场或电流的方向改变时，电磁力 F 的方向也随之改变，但若两者同时反向，则电磁力的方向保持不变。在直线电动机中，该电磁力拉着可动部分做直线运动；在旋转电动机中，该电磁力和转子半径的乘积形成电磁转矩，使电动机旋转。电动机旋转后，导体和磁场有了相对运动，导体切割磁场，在导体中产生感应电动势 e，其大小为

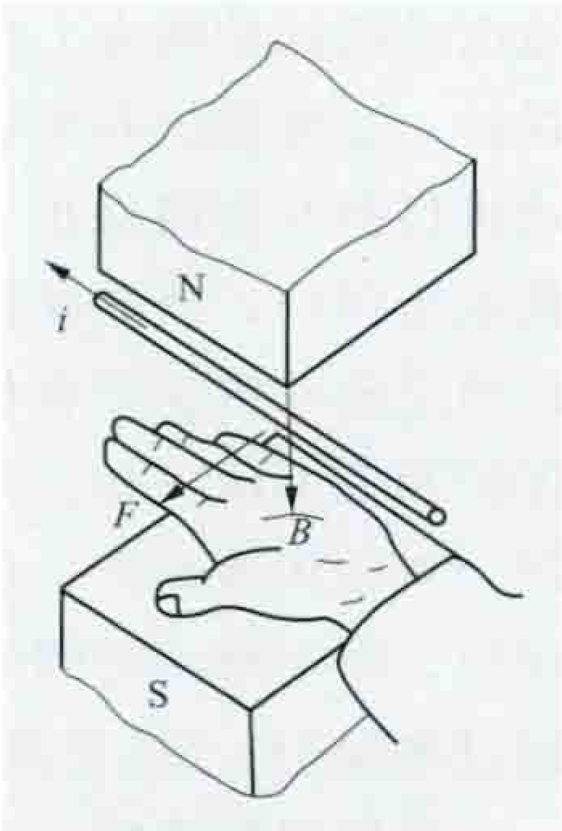


图 5　左手定则

$$e=Blv$$

式中 v 为导体与 B 之间的相对线速度，m/s；e 为感应电动势，V。

感应电动势、磁场和导体运动方向三者之间互相垂直，用右手定则确定，如图 6 所示。电动势 e 的方向与输入电流 i 的方向相反（见图 7），所以通常把这个电动势叫做反电动势。为了克服这个反电动势，使电流 i 能流入导体，外界电源必须输入电功率 $P=ei=Blvi$。与此同时，由于导体的运动，它能输出机械功率 $P=Fv=Bliv$，其值正好等于从电

源输入的电功率。这就是电动机将电能转换为机械能的实质。因电动机存在各种损耗，所以电功率（电性质的电磁功率）$P=ei$ 比电源输入的实际电功率小，机械功率（机械性质的电磁功率）$P=Fv$ 比电动机实际输出的机械功率大。

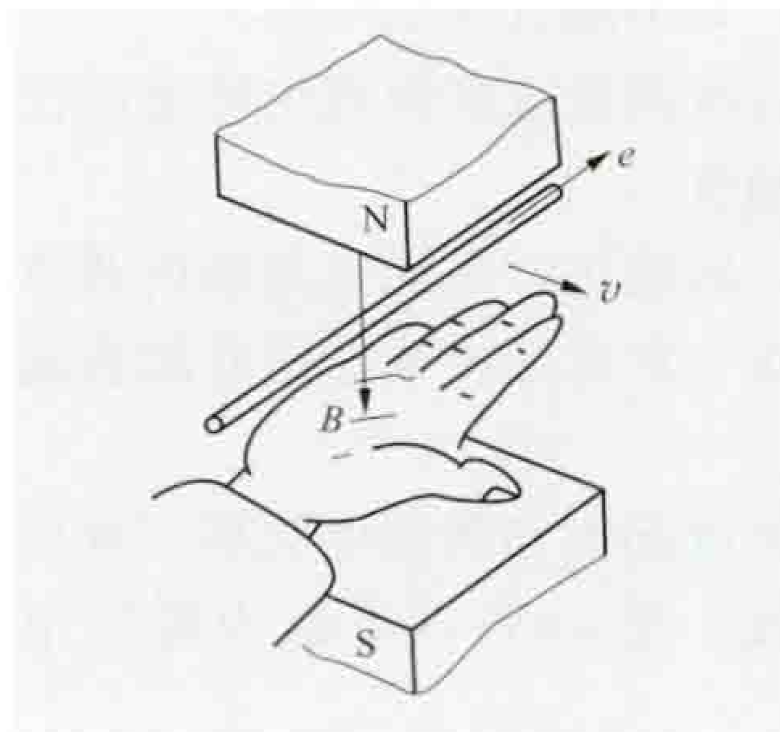


图 6　右手定则

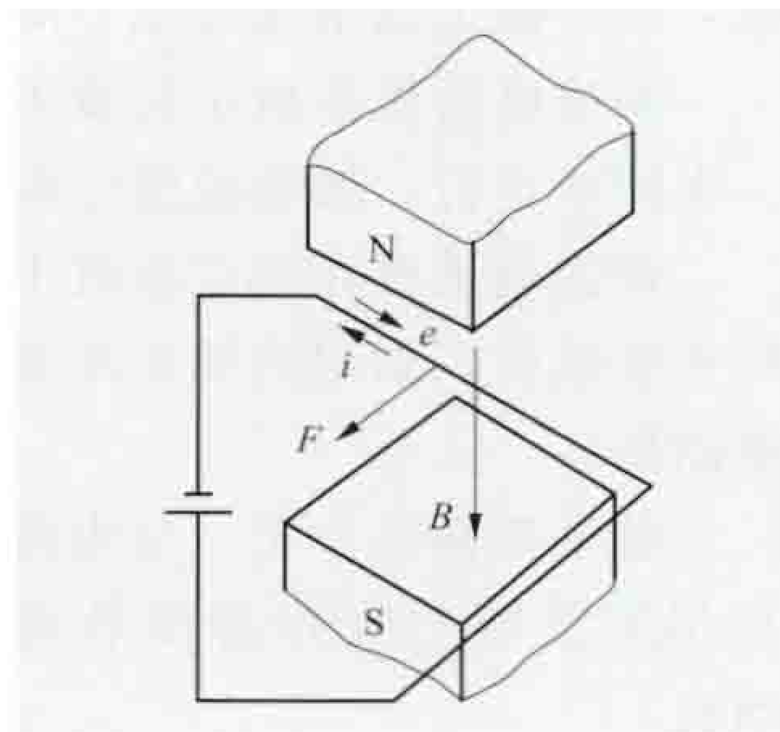


图 7　电动机的机电能量转换示意图

基本结构　电动机具有相对运动的两个部分，一般是静止和可动两个部分，它们之间必须有一定的间隙，称为气隙。在直线电动机中，静止部分叫初级或静子，可动部分叫次级或动子；在旋转电动机中，静止部分叫定子，可动部分叫转子。为了实现机电能量的转换，电动机中需要有一个磁场和一些通电流的线圈。这些线圈按一定规律连接起来形成绕组。电动机的绕组有两类：一类是专门用来通电产生磁场的绕组，称为励磁绕组，在永磁电动机中，没有励磁绕组，用永磁体建立励磁磁场；另一类绕组是用来流过工作电流，产生感应电动势，实现机电能量转换的，称为电枢绕组。电动机中放置励磁绕组的部件称为主极，放置电枢绕组的部件称为电枢。一般把励磁绕组套在主极极身外面，电枢绕组嵌在电枢铁芯槽内。电枢绕组通过电流时也产生磁场，称为电枢反应磁场，它对电动机气隙磁场的影响称为电枢反应。通常直流电动机的励磁绕组放在定子上，同步电动机的励磁绕组连同集电环放在转子上，从外部电源向励磁绕组通入直流电流，形成沿气隙圆周 N、S 交替排列的主极。直流电动机的电枢绕组放在转子上，从外部直流电源经电刷和换向器通入电流。同步电动机和感应电动机的电枢绕组放在定子上，从外部电源通入交流电流产生旋转磁场。感应电动机没有专门的励磁绕组，其旋转磁场是由放在定子上的电枢绕组中的交流电流产生的，放在转子上的绕组与外部电源不连接，自己形成短路绕组，由于该绕组与旋转磁场有相对运动而产生感应电动势，从而在短路绕组中产生电流。综上所述，电动机在运行时，各绕组中都有电流流过，这些载流绕组所起的作用有其共同点：①载流绕组都在产生电动机的磁场中起作用，即磁场是由载流的各绕组共同建立的。②在直流电动机和感应电动机中，转子上的载流绕组在磁场中受电磁转矩作用；在同步电动机中，定、转子上的载流绕组产生的磁场相互作用产生电磁转矩。这个电磁转矩驱动转子旋转，从而实现将电能向机械能的转换。

为了在电动机中获得较强的磁场，必须为磁通提供低磁阻的磁路，所以电动机的定子和转子磁路都采用导磁性能良好的铁芯。为了减少铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗，电动机的电枢铁芯通常用 0.5mm 厚的硅钢片叠压制成。

旋转电动机的定、转子除有铁芯和绕组外，还有一些其他构件，这些构件并不是每种电动机都必须全部具备，可以只有其中的一部分。旋转电动机的组成如下：



关键技术　为了满足生产机械对电动机的要求，应重点研究电动机的起动、调速、制动和保护四个关键技术。

电动机起动　一般提出四个方面的要求：①起动转矩必须大于起动时的负载转矩；②起动电流不要太大，应为电动机和电源所允许；③起动过程中的功率损耗应尽可能小；④起动设备尽可能简单、可靠、经济、易于操作和维护。（见电动机起动）

电动机调速　主要性能指标有：①静差率；②调速范围，也叫调速比，与静差率是互相制约的两个指标；③调速平滑性；④稳速精度；⑤响应时间；⑥运行象限；⑦超调。此外，还应考虑调速经济性，包括调速设备投资和运行费用。（见电动机调速）

在调速性能要求较高的场合，过去多用调速方便的直流电动机调速，但由于直流电动机有换向器、结构复杂、价格昂贵、维护困难，而交流电动机有结构简单、运行可靠、几乎不需维护等优点，因而许多工矿企业都希望采用交流电动机调速。

电动机制动　把电力拖动系统的动能或位能转变成电能，并使之消耗或反馈给电源，从而使电动机迅速停转或自高速迅速减至低速，或限制转速的上升。制动时，电动机的电磁转矩与转速方向相反，是制动性转矩。常用的制动方法有能耗制动、回馈制动（又叫再生制动）和反接制动 3 种。（见直流电动机制动、交流电动机制动）

电动机保护　为了使电动机能够长期安全运行，需要采用一些保护措施。中、小容量低压直流电动机保护有过电流保护、过电压保护和零励磁保护。大容量高压或特殊用途直流电动机保护除有上述三种保护外，还有接地保护、过负荷保护、过速保护和快速过电流保护。中、小容量低压感应电动机保护有短路保护、堵转保护、过负荷保护、断相保护、低电压保护、漏电保护和定子绕组温度检测保护。大容量高压感应电动机保护有相间短路保护、单相接地保护、过负荷保护和低电压保护。大容量高压同步电动机保护除了短路保护、单相接地保护、过负荷保护和低电压保护外，还有失步保护、限制起动时间的保护、限制强励时间的保护和定子绕组过热保护。（见直流电动机保护、交流电动机保护）

电动机的选择　合理选择电动机应在满足生产机械要求的条件下，使电动机在效率高、损耗低、经济效益最佳的状

态下运行。选择电动机时，应考虑电动机的类型、额定功率、效率、转矩-转速特性、外部结构形式和防护等级、电源及额定转速等。

电动机类型的选择　应考虑负载对起动、制动、调速以及对调速性能的要求等。无特殊要求时，应选用笼型感应电动机。在企业配电电压允许的条件下，容量在200～355kW之间宜选用低压电动机；容量在355kW以上应选用高压电动机。对于年运行时间大于3000h，负载率大于50%的场合，宜采用高效率电动机。

电动机额定功率的选择　选择电动机的额定功率时，要考虑电动机的发热和最大转矩，对笼型感应电动机还应考虑起动转矩。在电动机中，耐热最差的是绕组的绝缘材料，不同等级的绝缘材料，其极限温度不同，见表2。如超过极限温度，则加速绝缘老化，使电动机寿命缩短，甚至烧坏。通常考虑温升，即电动机温度与周围环境温度之差。电动机各部位的极限温升在有关国家标准中都有规定。

表2　绝缘材料的极限温度

绝缘等级	A	E	B	F	H	C*
极限温度（℃）	105	120	130	155	180	180以上

*　有的地方用“200”表示，相应的极限温度为200℃。

电动机额定功率的选择步骤是：①根据机械负载变化规律得出的典型负载图，确定电动机的工作制类型（见表1），再计算出电动机的实际负载功率。②根据机械负载类型和重要性，乘以适当的储备系数，使电动机的实际负载率（以百分数表示的实际输出功率与其额定功率之比）接近经济负载率（电动机运行效率最高时的负载率）。③当电动机使用地点的海拔和介质温度与规定的工作条件不同时，其额定功率应按旋转电动机基本技术要求的有关标准或制造厂的规定予以修正。

电动机效率的选择　应考虑：①电动机的额定效率随着额定功率、额定转速的增加而增加。②在电动机的技术条件和产品样本中，通常给出的是额定负载时的效率 η_N。电动机的效率随负载率的不同而异，不同规格、不同系列的电动机，其效率与负载率的函数关系也不一样。因此，应根据电动机的实际负载率，选用效率较高的电动机。

美国电气制造商协会（NEMA）标准中规定，电动机的效率通常给出的是额定负载、3/4负载和1/2负载下的效率。日本在电动机使用手册中、中国在国家标准中也都给出上述负载下电动机的效率，供用户选择。

电动机转矩-转速特性的选择　电动机转矩-转速特性是电动机的电磁转矩 T 和转速 n 之间关系的特性，以函数 $n=f(T)$ 表示，又称电动机机械特性。电动机转矩-转速特性应与负载的负载特性匹配，以确保电力拖动系统的运行安全和提高系统电能利用率。

电动机外部结构形式和防护等级的选择　应根据电动机使用环境是否存在腐蚀性，是否有起火、爆炸危险，灰尘和粉尘的多少，温度和湿度的高低，水和油的浸入情况等来选择。

电动机电源的选择　包括电动机的电源类别和电压等级的选择，应按照电动机的额定功率和所在系统的配电电压和配电方式综合考虑确定，还应考虑电动机运行期间电源电压和频率的变化，以及电源电压的波形和对称性等。

电动机额定转速的选择　额定功率相同的电动机，额定转速愈高，电动机的尺寸和质量愈小，成本愈低，效率和功率因数愈高，因此高速电动机较经济。但由于生产机械对转速有一定要求，电动机的转速愈高，势必加大传动装置的传动比，导致传动装置复杂化和传动效率降低，因此，应在综合考虑电动机和生产机械两方面的各种因素后，再确定较为合理的电动机额定转速。

发展趋势　随着人们对生活质量要求的提高和环境保护意识的日益加强，以及电动机应用范围的扩大和需求量的增加，电动机将朝着节约电力，降低振动噪声，提高可靠性，改善调速、起动和控制性能，降低材料用量，多品种，新用途等方向发展。其特点是符合节能要求、产品标准化、降低噪声污染、实现机电一体化、采用新材料。

（1）符合节电要求。根据不同使用要求，正确选择电动机的类型、容量、电压和极数；应用高效率电动机；采用先进的电动机调速方式和控制设备；加强电动机的运行管理和维修；改进电动机的设计和制造工艺，利用计算机进行电动机最优化设计。

（2）产品标准化。电动机生产不仅标准化，还将系列化和通用化。使电动机的功率等级、安装尺寸及基本技术要求等，与国际标准等同。

（3）降低电动机振动噪声对环境的污染。研究电动机振动噪声源，从而采取有效措施，降低甚至消除振动噪声。

（4）实现机电一体化。微电子技术、计算机技术、控制技术与电动机结合，把以微机为基础的电子控制装置与电动机及工作机构结合在一起，使电动机能方便地受到控制，适应负载的任何变化，具有更高的运行效率，以及更高的灵活性和可靠性。

（5）为适应新技术的发展对电动机提出的各种新要求，发展专用特殊电动机，扩大派生、专用系列产品的产量，例如平面电动机、弧形电动机、球形电动机、直线电动机等。

（6）采用新材料，将推动电动机的改进和新品种的实现。材料科学的新成果不断提高电动机的制造水平，如以合成高分子化合物为基础的新型电动机绝缘材料，减小了电动机绝缘厚度，并可提高电动机温升。低损耗、高磁导率的冷轧硅钢片使铁损降低到0.4W/kg以下。采用非晶态合金制造的电动机使铁损减少70%～80%。高磁能积的钕铁硼等稀土永磁材料的发展，使永磁电动机成为重要而有前途的电动机，永磁电动机在高性能伺服驱动领域占据了垄断地位，随着功率向兆瓦级别的拓展，在机车牵引、舰船推进等大功率电力拖动领域也将获得越来越多的应用。超导材料研究的进展将会给电动机带来重大变革。利用超导体可以获得稳态高强磁场而只需消耗极少的电能。绕组由实用超导线（简称超导线，用超导材料等制成，在强磁场下能承载高电流密度的导线）绕制成的超导电动机具有功率密度大、质量轻、体积小和效率高等优点，是很有发展前途的电动机。使用超导电动机驱动潜艇和水面船只，还可以消除传动噪声，改善灵活性和隐蔽性。高温超导材料研究的进展，为超导电动机的实用化展现了新的前景。

参考书目

李发海，朱东起．电机学．3 版．北京：科学出版社，2001.

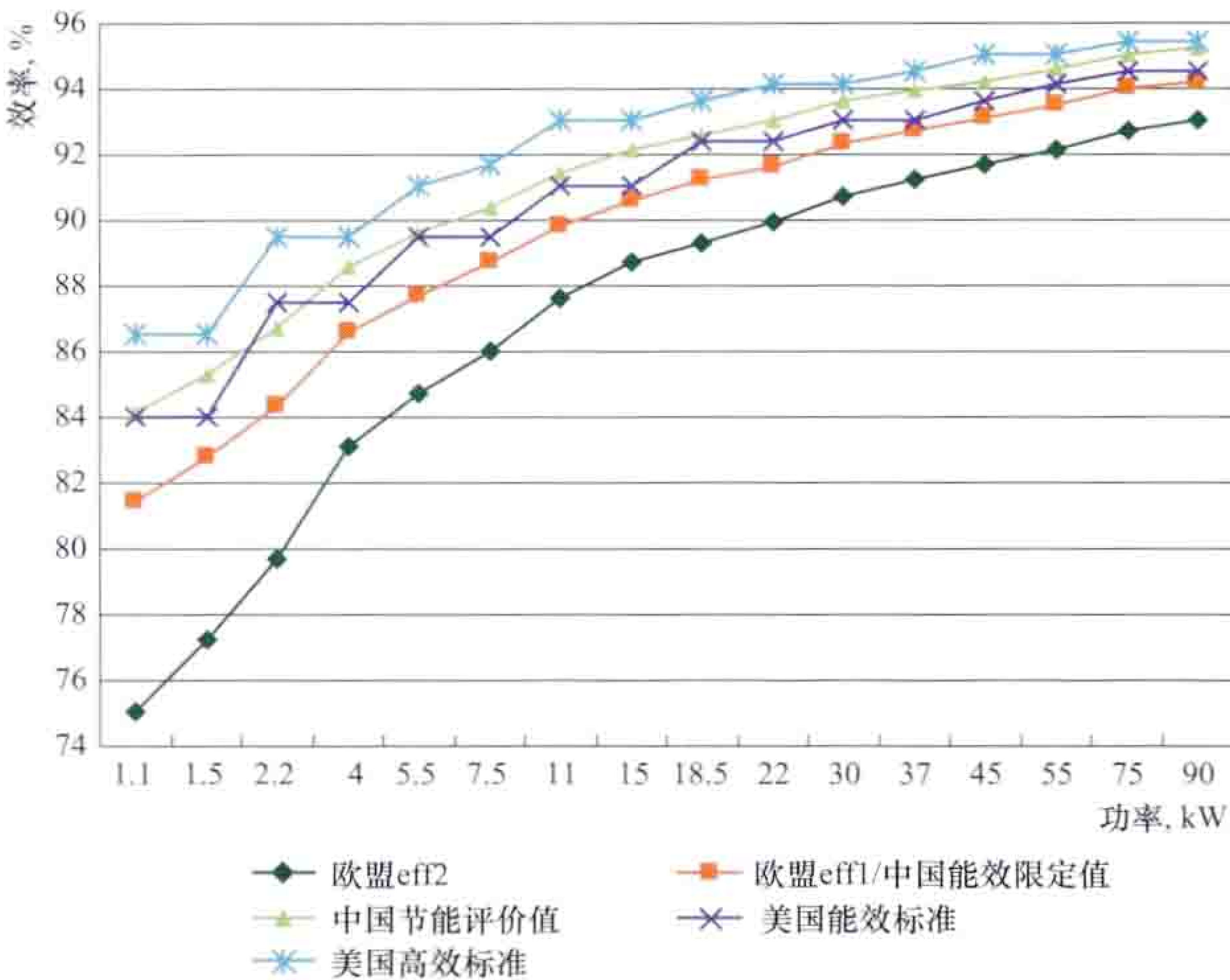
汤蕴璆，徐德淦．电机学．北京：机械工业出版社，2012.

diandongji jiedian jishu

电动机节电技术 (electricity saving technology of electric motors) 降低或减少电动机损耗或电动机运行中引起的电能损耗的方法与措施。电动机是将电能转变为机械能的设备，被广泛地用做风机、水泵、压缩机及其他拖动传送等设备的动力，是工农业生产和人民生活中用电最多的一种电气设备。全世界工业用电动机消耗了总发电量的30%～40%，中国各类电动机总容量约 5 亿 kW，用电量约占全国总用电量的 60%，能源利用率比国际先进水平低10%～30%，节能潜力较大。因此，提高电动机的效率、积极推广高效率电动机或节能电动机的应用，对国民经济建设、能源节约及环境保护等都具有积极的促进作用。

电动机的主要节电途径有选用高效电动机、风机节电技术、泵节电技术和调速运行技术等。

高效电动机 比通用标准型电动机具有更高效率的电动机。高效电动机从设计、材料和工艺上采取措施，通过降低电磁能、热能和机械能的损耗，提高输出效率。与标准电动机相比，通常情况下，高效电动机的效率可平均提高 4%。



标准和高效电动机的效率图

标准 许多国家制定和实施了有关电动机的能效标准。美国、加拿大、欧盟相继颁布了有关法规。欧盟根据电动机的运行时间，将效率分为 eff1（最高）、eff2、eff3（最低）三个等级。IEC 60034-30《单速三相笼型感应电动机效率分级》将电动机的效率分为 IE1（对应 eff2）、IE2（对应 eff1）、IE3、IE4（最高）四个等级。GB 18613—2012《中小型三相异步电动机能效限定值及能效等级》参考了 IEC 60034-30，其电动机额定功率和电动机极数的范围与 IEC 60034-30 保持一致，规定的能效 3 级的效率值与 IEC 60034-30 的 IE2 保持一致，规定的能效 2 级的效率值与 IEC 60034-30 的 IE3 保持一致，规定的能效 1 级的效率值与 IEC 60034-30 的附录 A 中的推荐表保持一致。图中给出了美国、欧盟和中国高效电动机效率，表 1 和表 2 分别给出了美国和中国高效电动机的效率。

表 1 美国超高效率标准和高效标准电动机的效率

功率 (kW)	美国超高效率标准 (%)			美国高效标准 (%)		
	2 极	4 极	6 极	2 极	4 极	6 极
1.1	84.0	86.5	86.5	82.5	84.0	85.5
1.5	85.5	86.5	87.5	84.0	84.0	86.5
2.2	85.5	89.5	88.5	85.5	87.5	87.5
4	86.5	89.5	89.5	87.5	87.5	87.5
5.5	88.5	91.0	90.2	88.5	89.5	89.5
7.5	89.5	91.7	91.7	89.5	89.5	89.5
11	90.2	93.0	91.7	90.2	91.0	90.2
15	91.0	93.0	92.4	90.2	91.0	90.2
18.5	91.7	93.6	93.0	91.0	92.4	91.7
22	91.7	94.1	93.6	91.0	92.4	91.7
30	92.4	94.1	94.1	91.7	93.0	93.0
37	93.0	94.5	94.1	92.4	93.0	93.0
45	93.6	95.0	94.5	93.0	93.6	93.6
55	93.6	95.0	94.5	93.0	94.1	93.6
75	93.6	95.4	95.0	93.6	94.5	94.1
90	94.1	95.4	95.0	94.5	94.5	94.1

表 2 中国电动机能效等级及效率

额定功率 (kW)	效率 (%)								
	1 级			2 级			3 级		
	2 极	4 极	6 极	2 极	4 极	6 极	2 极	4 极	6 极
0.75	84.9	85.6	83.1	80.7	82.5	78.9	77.4	79.6	75.9
1.1	86.7	87.4	84.1	82.7	84.1	81.0	79.6	81.4	78.1
1.5	87.5	88.1	80.2	84.2	85.3	82.5	81.3	82.8	79.8
2.2	89.1	89.7	87.1	85.9	86.7	84.3	83.2	84.3	81.8
3	89.7	90.3	88.7	87.1	87.7	85.6	84.6	85.5	83.3
4	90.3	90.9	89.7	88.1	88.6	86.8	85.8	86.6	84.6
5.5	91.5	92.1	89.5	89.2	89.6	88.0	87.0	87.7	86.0
7.5	92.1	92.6	90.2	90.1	90.4	89.1	88.1	88.7	87.2
11	93.0	93.6	91.5	91.2	91.4	90.3	89.4	89.8	88.7
15	93.4	94.0	92.5	91.9	92.1	91.2	90.3	90.6	89.7
18.5	93.8	94.3	93.1	92.4	92.6	91.7	90.9	91.2	90.4
22	94.4	94.7	93.9	92.7	93.0	92.2	91.3	91.6	90.9
30	94.5	95.0	94.3	93.3	93.6	92.9	92.0	92.3	91.7
37	94.8	95.3	94.6	93.7	93.9	93.3	92.5	92.7	92.2
45	95.1	95.6	94.9	94.0	94.2	93.7	92.9	93.1	92.7
55	95.4	95.8	95.2	94.3	94.6	94.1	93.2	93.5	93.1
75	95.6	96.0	95.4	94.7	95.0	94.6	93.8	94.0	93.7
90	95.8	96.2	95.6	95.0	95.2	94.9	94.1	94.2	94.0
110	96.0	96.4	95.6	95.2	95.4	95.1	94.3	94.5	94.3
132	96.0	96.5	95.8	95.4	95.6	95.4	94.6	94.7	94.6
160	96.2	96.5	96.0	95.6	95.8	95.6	94.8	94.9	94.8
200	96.3	96.6	96.1	95.8	96.0	95.8	95.0	95.1	95.0
250	96.4	96.7	96.1	95.8	96.0	95.8	95.0	95.1	95.0
315	96.5	96.8	96.1	95.8	96.0	95.8	95.0	95.1	95.0
355～375	96.6	96.8	96.1	95.8	96.0	95.8	95.0	95.1	95.0

技术措施　电动机的损耗分布随功率大小和极数不同而变化。为降低损耗，提高电动机能效，应着重对不同功率和极数时的主要损耗分量采取措施。①采用较好的磁性材料和工艺措施以降低铁耗。②缩小风扇降低通风损耗。③通过设计和工艺措施降低杂散损耗。④改进压铸工艺，降低转子损耗。⑤应用计算机优化设计，降低损耗，提高效率。⑥采用较大截面积的铜导线并缩短绕组端部长度、增大电动机的槽满率，降低铜损。处于非经济运行状态的老式电动机，除了更新为高效电动机外，还可采用降低电动机的铁损、杂散损耗、机械风摩损耗、定子和转子铜损等措施，使之处于经济运行区或允许运行状态达到节电目的：①采用槽泥或磁性槽楔改造低压电动机，减少电动机的杂散损耗。②采用节能风扇，降低电动机的机械损耗（风摩损耗）。③改接电动机绕组，减少其杂散损耗与铜损。④重绕定子绕组，增大铜线线径，减少铜损，降低温升；提高绕组绝缘等级，降低通风损耗。

选用要求　优先选用高效电动机的场合：①新上项目或设备时。②旧电动机损坏或需要更换时。③电动机长期处于非经济运行状态或运行于低负载或过负载状态下。④年运行小时超过2500h不经济运行时。

更换或改造电动机注意事项：①必须满足接卸负载拖动要求，使之处于经济运行状态。②根据工作环境和拖动负载，合理选择防护等级、电压等级、工作定额等。一般200kW以上的电机宜选用高压电动机。③应使电动机与被驱动设备能很好地匹配，使其运行在负载的高效区域，负载率为75%左右。

高效电动机与普通电动机的设计特点和性能比较见表3。

表3　高效电动机与普通电动机的设计特点及性能比较（效率达限定值）

项　目	普通电动机（以Y系列为例）	高效电动机（以YX3系列为例）
铁芯材料	DR510-50	DW470-50
叠压系数	0.92～0.95	0.98
绕组形式	单（双）叠绕组	单（双）叠绕组
外风扇	普通径向风扇	经优化设计的低损耗离心式风扇
效率（%）	一般	比普通电动机高1%～3%
功率因数 $\cos\varphi$	较好	好
堵转电流倍数	较低	稍高
振动	好	好
噪声	用户特殊要求才按Ⅰ级考核，绝大部分电动机按Ⅱ级考核	噪声低
电动机温升	较高	低
防护等级	IP44	IP55
运行特点	一般场合运行	可在运行时间长、负载率高的场合下运行
制造成本	100%	115%～130%
经济效益	较好	很好
节电	一般	很好
绝缘等级	B级	F级
振动性能	N级	R级（提高一级）
互换性	符合IEC标准和DIN42673规定	符合IEC标准和DIN42673规定

风机节电技术　见风机节电技术。

泵节电技术　见泵类节电技术。

调速运行技术　交流电动机与直流电动机相比，具有单机容量大，转速高，耐高压，对环境适应性强，结构简单，体积、质量、价格均比同容量的直流电动机小等特点。进行交流电动机调速，可以得到明显的节能效果。

交流电动机的调速可分为高效调速和低效调速两大类。从节能和调速性能比较，交流电动机最理想的调速方法是变频调速，即改变电动机供电电源的频率。

高效调速　调速时基本保持额定转差，不增加转差损耗，或可以将转差功率回馈至电网。高效调速技术有变极对数调速、变频调速、交流串级调速和无换向器电机调速。其中，变极对数调速方式和变频调速方式主要适用于笼型感应电动机，串级调速方式主要适用于绕线转子电动机，无换向器电动机调速方式主要适用于同步电动机。

变极对数调速的优点：①无附加转差损耗，效率高；②控制电路简单，易维修；③与定子调压调速或电磁转差离合器调速配合可得到效率较高的平滑调速。其缺点为：①有级调速，不能实现无级平滑的调速；②调速范围相当有限，因受电动机结构和制造工艺限制，只能实现2～3种极对数的有级调速。应用范围为不需要无级调速的生产机械。

变频调速的优点：①无附加转差损耗，效率高，调速范围宽；②对于低负载运行时间多，或起停运行频繁的场合，有节电和保护电动机的作用。其缺点为：①技术较复杂；②价格较高；③对电网有污染。应用范围为要求精度高、调速性能较好的场合。

交流串级调速的优点：①可以将调速过程中产生的转差能量回馈利用，效率高；②装置容量与调速范围成正比，适用于调速范围在额定转速70%～95%的生产机械。其缺点为：①功率因数较低；②有谐波干扰；③正常运行时无制动转矩。应用范围为风机、水泵、轧钢机、矿井提升机和挤压机等。

无换向器电动机调速的优点：①结构简单，调速性能良好；②低速时用电源电压、高速时用电动机反电动势自然环流，运行可靠；③无附加转差损耗，效率高。其缺点为过载能力较低，电动机自身容量得不到充分发挥。应用范围为各类伺服及驱动系统。

低效调速　调速时改变转差，增加转差损耗。低效调速技术有：①定子调压调速；②电磁转差离合器调速；③转子串电阻交流调速。其中：定子调压调速方式和电磁转差离合

器方式主要适用于笼型感应电动机，转子串电阻交流调速方式主要适用于绕线转子电动机。

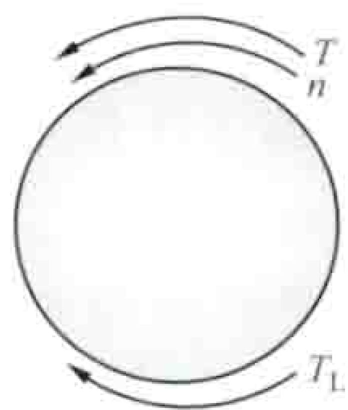
diandongji qidong

电动机起动 (startup of motor) 电动机从静止状态加速到工作转速的整个过程。包括通电、最初起动和加速过程，必要时还包括与电源同步的过程。最初起动是指电动机从静止到开始转动这一瞬间的状态；加速是指电动机从最初起动直到工作转速的过程。

起动过渡过程 电动机的起动过程是过渡过程，用电力拖动系统运动方程式可以分析、说明该过渡过程。电力拖动系统的运动方程式为

$$T-T_L=\frac{GD^2}{375}\times\frac{dn}{dt}$$

式中 T 为电动机的电磁转矩，N·m；T_L 为电动机的负载转矩，N·m；GD^2 为电动机轴上总的飞轮矩，N·m²；n 为电动机的转速，r/min；375 为带有量纲的换算常数，m/(min·s)。电力拖动系统各量的参考方向见图。



电力拖动系统各量的参考方向

从上式可知，只有电动机的电磁转矩大于负载转矩时，$\frac{dn}{dt}>0$，电力拖动系统才处于加速过渡过程。因此，若起动电动机，必须使电动机的电磁转矩 T 大于负载转矩 T_L。电磁转矩 T 是由电动机产生的驱动转矩，电动机从静止起动瞬间的电磁转矩称为最初起动转矩。为了使电动机能从静止顺利地加速到工作转速，最初起动转矩应大于电动机从静止起动瞬间的负载转矩，同时在整个起动过程中，还必须要求电磁转矩都大于负载转矩，才能使 $\frac{dn}{dt}>0$。在相同的飞轮矩下，加速转矩（$T-T_L$）越大，则加速越快，起动时间越短。加速过程中，直至 $T-T_L=0$ 时，$\frac{dn}{dt}=0$，电动机起动过渡过程完毕，进入以恒定转速旋转的稳定运行状态。

起动要求 为了安全、可靠、经济地起动电动机，对起动的要求：①应该有足够大的最初起动转矩，并且电动机的机械特性（即电动机的电磁转矩随转速变化的曲线）与负载特性（即负载转矩随转速变化的曲线，又称负载转矩特性）配合恰当，使之有足够大的加速转矩。在一定的负载转矩 T_L 下，提高电动机起动时的电磁转矩是增大加速转矩，从而加快起动过渡过程的有效措施。但是，由于电动机的电磁转矩与电流有关，所以最大起动转矩受到电动机最大允许电流的限制。在交流电动机的技术条件中，对最初起动转矩与额定转矩之比、起动过程的最小转矩与额定转矩之比等指标都有明确的规定。②起动电流应尽可能小，以免影响电动机本身及同一线路上其他电动机和电气设备的正常运行。对于直流电动机，起动电流受换向最大允许电流的限制。③起动过程中的功率损耗应尽可能小。④起动设备尽可能简单、可靠、经济，易于操作和维护。

上述四方面的要求往往相互制约，在不同的使用场合，要求的侧重面有所不同，实际应用中应根据不同的要求，合理选择电动机及其起动方法。

见直流电动机起动、交流电动机起动。

diandongji tiaosu

电动机调速 (speed control of motor) 根据被拖动机械的工况需要，对电动机的转速进行控制的技术。由于生产的需要以及从节能、提高自动化水平、延长被拖动机械的使用寿命等方面出发，人们使用了多种可调速的动力。电动机调速具有调速范围宽广、控制性能好、效率高、使用维护方便、环境适应性强、不污染环境等优点，因而被广泛应用。电动机调速通常分为直流电动机调速和交流电动机调速两大类。从能量消耗角度看，电动机调速又可分为低效率的调速方法和高效率的调速方法两类。直流电动机电枢串电阻调速、交流绕线式转子串电阻交流调速、交流调压调速属于低效率的调速方法，但调速设备比较简单。直流电动机调压调速、直流电动机调磁调速、交流变极调速、交流串级调速、变频调速属于高效率的调速方法，但所需设备比较复杂。电动机调速需由电动机调速系统来实现，调速系统的好坏要由性能指标来考核、判定。

性能指标 主要的指标有静差率、调速范围、调速平滑性、稳速精度、响应时间、运行象限、超调等。

静差率 电动机负载由理想空载增加到额定负载时所产生的转速降 Δn 与理想空载转速 n_0 之比的百分数，以 s 表示，即

$$s=\frac{\Delta n}{n_0}\times100\%=\frac{n_0-n}{n_0}\times100\%$$

静差率 s 表示了调速系统在负载扰动下被调量 n 偏离给定值的程度，即用来衡量调速系统的静态精度。

调速范围 在额定负载及满足被拖动机械所必需的各项调速指标（如静差率不大于规定值）前提下，能够达到的最高转速 n_{max} 与最低转速 n_{min} 之比，也称调速比，以 D 表示，即

$$D=\frac{n_{max}}{n_{min}}$$

调速平滑性 在一定的调速范围内，调速级数越多，则认为调速越平滑。平滑的程度用平滑系数 φ 表示，它是相邻两级转速之比，即

$$\varphi=\frac{n_i}{n_{i-1}}$$

φ 值越接近 1，则平滑性越好，φ 趋近于 1 时，称为无级调速。

稳速精度 在规定的电源电压、电源频率和负载波动条件下，在规定的测试时间内，不少于规定次数的转速测量值（每次测量时间以秒计）的均方根误差与额定转速之比的百分数。（见稳速控制）

对于某些高精度稳速系统，由于采用静差率来衡量系统性能时没有规定电网电压的幅值和频率扰动对转速的影响，因而是不够完善和不够确切的，故采用稳速精度来衡量调速系统的动态精度。

响应时间 从一个规定的激励加到系统时起，输出量按所要求的校正作用方向第一次达到规定值（如取输出量最终稳态值的 95%作为规定值）的时间，如图 1 中的 t_r。响应时间是电力拖动系统的动态指标之一，它可考查系统对给定输入跟随性的快慢，t_r 越小，表示系统快速性越好。

运行象限 绘制在以正负转矩和正负转速构成的直角平面坐标里的电动机特性曲线（或曲线簇），被坐标轴分割成

4份（见图2），分别称为电动机的第1、2、3、4象限运行转矩-转速曲线。在第1、3象限中，转矩的方向与转速方向相同，属电动运行状态，即将电功率转变为机械功率；在第2、4象限中，转矩的方向与转速方向相反，属制动运行状态，即将机械功率转变为电功率。

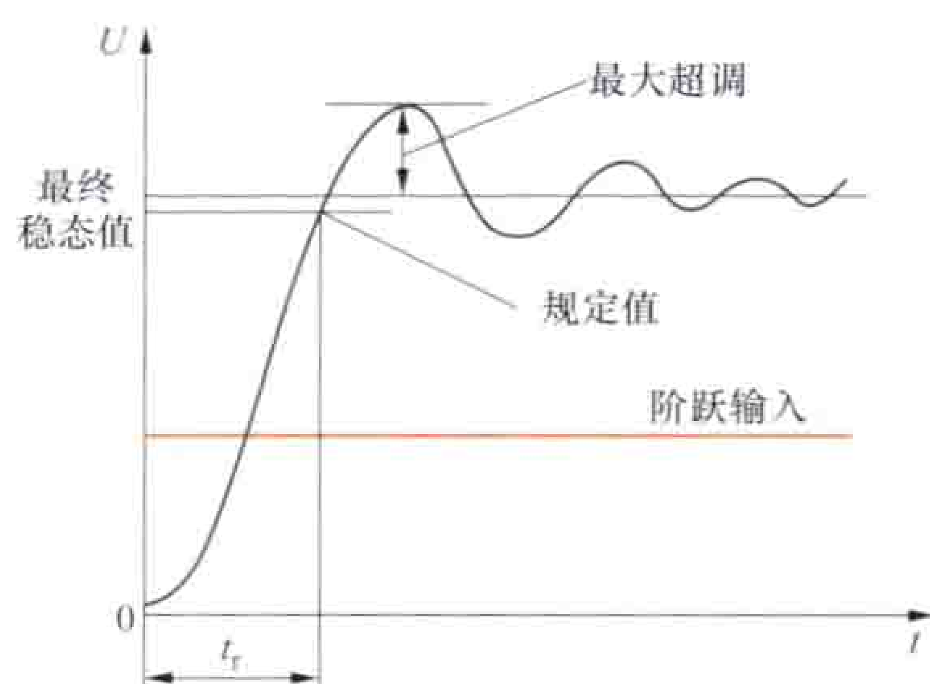


图1　对单位阶跃输入的响应曲线

例如：拖动水泵的电动机，仅处于第1象限运行状态；可逆转搅拌机的电动机，处于第1、3象限运行状态；拖动电梯升降的电动机则作第1～4象限运行。凡是能实现快速正、反转运行的系统，称可逆调速系统，否则为不可逆调速系统。运行象限和可逆与不可逆运行反映了生产机械对电动机的运行要求，电力拖动系统必须满足这一运行要求。

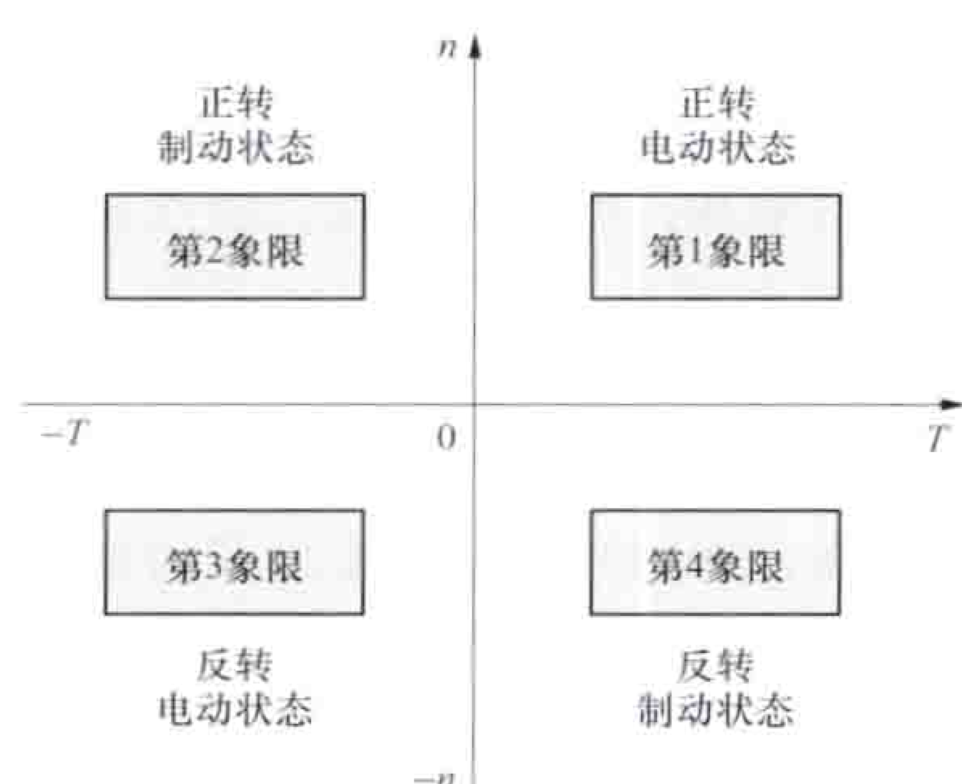


图2　电力拖动的四象限运行示意图

超调　就阶跃响应来说，偏离输出量最终稳态值的最大瞬时偏差与最终稳态值之比，以百分数表示。这一指标也属于动态性能指标，反映了对给定输入的瞬时最大偏离程度。超调量小表示系统的稳定性好。

除上述具体性能指标外，调速性能还应考虑调速的经济性，即调速设备的投资和运行费用。不同的使用场合，对生产机械有不同的要求，应当根据被拖动机械的具体情况，确定应考核哪些性能指标以及应采用的数据水平。

交、直流调速的比较与选择　由于直流电动机具有转矩与励磁解耦的特点，因而具有优越的调速性能。自19世纪上半叶直流电动机诞生以后，在相当长一段历史时期内，直流电动机调速在电力拖动中占据着统治地位。与直流电动机相比较，交流电动机具有结构简单、牢固可靠、质量轻、转动惯量小、效率高、价格低、对环境的适应性强、无换向器等特点，因而维护工作量小。但在实现高性能调速时，其控制技术则比直流调速复杂。直至20世纪七八十年代后，由于半导体技术、电力电子技术、微机应用及控制技术的发展，交流电动机调速技术发展迅速，其许多性能指标不仅可以与直流调速相媲美，而且有所超过。因此交流电动机调速逐步取代了直流电动机调速的地位。

在选择交、直流调速时，一般可以从转动惯量、功率与转速之积、工作环境、调整维护水平、初始投资、损耗与冷却及对电网的影响等方面考虑。

转动惯量　为改善换向条件，要求直流电动机转子短粗，因而造成转动惯量大。一般交流电动机无此限制，转子细长，因而转动惯量小，有利于快速响应。为了减少转动惯量而采用的双电枢或三电枢直流电动机的方法，有价格高、占地面积大且易产生轴系扭振的缺点。

功率与转速之积　直流电动机由于受离心力和换向片间耐压的制约，其额定转速与额定功率的乘积的极限小于交流电动机的2%。直流电动机的额定转速与额定功率的乘积的极限在（2～4）$\times10^6$kW·r/min以下，因此特大容量或高转速的调速系统宜采用交流调速。

工作环境　交流电动机无换向器，维护工作量小，较宜用于多尘、多水汽、易燃、易爆及有放射性的环境。

调整维护水平　为了获得相同的调速性能，交流调速系统比直流调速系统更复杂，对调整、维护的水平要求更高。

初始投资　高性能的、能四象限运行的交流调速装置的价格通常比直流可逆调速装置高，但交流感应电动机比同容量直流电动机便宜。

损耗与冷却　直流电动机的负载电流流入转子回路，散热困难，需要通风冷却的功率大。采用交流同步电动机时，主回路功率流入定子，散热条件比直流电动机好，通风冷却功率比直流电动机减少一半左右。采用交流感应电动机时，主回路功率流入定子，功率因数低，效率与直流电动机相接近。

对电网的影响　晶闸管相位控制直流调速有输入功率因数低及输入电流中存在5，7，11，13等高次谐波的问题，晶闸管交流-直流-交流变频交流调速装置的输入部分仍是可控整流，对电网的影响与晶闸管相位控制直流调速时相同。

晶闸管交流-交流变频交流调速也基于移相控制，输入功率因数与晶闸管相位控制直流调速时相似，输入电流中除5，7，11，13等高次谐波外，还引入旁频，但幅值减小。

参考书目

黄立培．电动机控制．北京：清华大学出版社，2003.

陈伯时，陈敏逊．交流调速系统．2版．北京：机械工业出版社，2005.

diandong qiche

电动汽车　（electric vehicle）　部分或全部以车载电源为动力，向电动机提供电能驱动车轮行驶的道路车辆。电动汽车以能量利用率高，可实现近似零排放；运行平稳，噪声低；结构简单，使用维修方便等优势得以迅速发展。电动汽车的使用需要一定的配套设施（见电动汽车充换电站、电动汽车充换电桩）进而带动了相关产业链的蓬勃发展。电动汽车及其充换电站如图1所示。



图1　电动汽车及其充换电站

分类 按照动力源的类型，电动汽车可以分为纯电动汽车（BEV）、混合动力汽车（HEV）和燃料电池汽车（FCEV）。

纯电动汽车 以车载可充电蓄电池或其他能量储存装置为动力源的汽车。

混合动力汽车 以燃料或可充电能/能量储存装置为动力源的汽车。它将传统内燃发动机、电动机、动力电池、发电动机等以串联、并联或混联方式组合在一起。混合动力汽车至少有两个动力来源，通常一个为传统发动机，另一个为动力电池，兼具了传统内燃机车续驶里程长和电动汽车低能耗低排放的特点。根据动力系统结构形式，混合动力汽车可分为串联式混合动力汽车（SHEV）、并联式混合动力汽车（PHEV）和混联式混合动力汽车（CHEV）。

（1）串联式混合动力汽车。发动机带动发电机发电，电能输送给电动机或对电池充电，由电动机驱动汽车行驶，动力电池也可以单独向电动机提供电能驱动汽车行驶。其动力系统结构见图2。

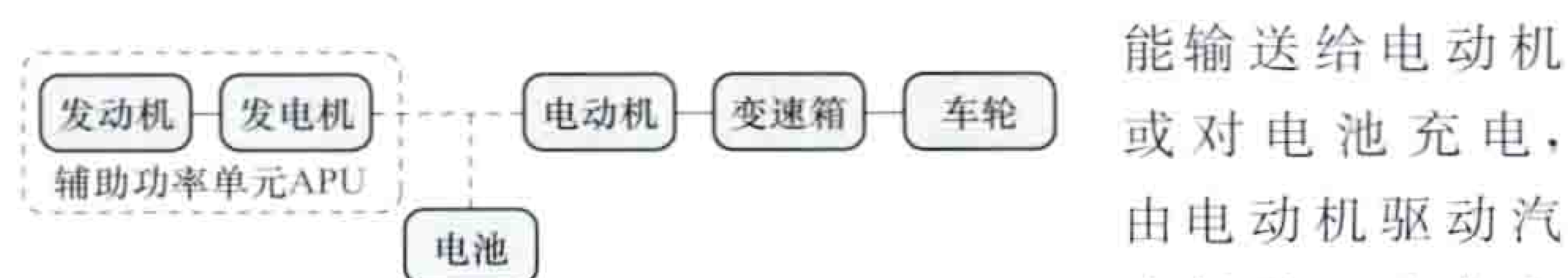


图2 典型串联式混合动力系统

（2）并联式混合动力汽车。可以单独使用发动机或电动机作为动力源，也可以同时使用两者作为动力源驱动汽车行驶。其动力系统结构见图3。

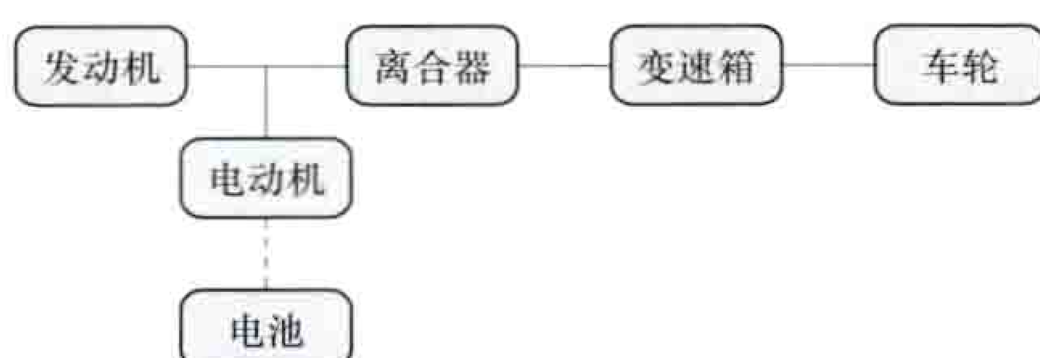


图3 典型并联式混合动力系统

（3）混联式混合动力汽车。可以在串联混合模式下工作，也可以在并联混合模式下工作，兼具了串联式和并联式的特点。其动力系统结构见图4。实现混联功能的行星齿轮机构具有较大的变速比，兼有变速的功能。



图4 典型混联式混合动力系统

燃料电池汽车 以燃料电池作为主要动力电源，一般配备动力电池作为辅助动力电源。燃料电池汽车主要以氢气为燃料，排放产物主要是水。其动力系统结构见图5。

关键技术 包括动力电池技术、电机技术、整车电控技术和充换电技术。

动力电池技术 动力电池的选择、参数设计和控制技术，决定了电动汽车的续驶里程和成本。电动汽车动力电池的功能指标和经济指标包括：①安全性（防止电池发生漏液、着火、爆炸等事故）；②比能量（单位质量的电池存储的能量）；③比功率（单位质量电池的功率）；④寿命（电池充放电循环次数）；⑤价格；⑥能量转换效率。常用的动力电池有铅酸蓄电池、镉-镍蓄电池、氢-镍蓄电池、锂离子蓄电池、超级电容器、燃料电池等。



图5 典型的燃料电池动力系统

铅酸蓄电池应用于电动汽车的优点是安全性好，价格低廉，废电池易回收再生。缺点是比能量和比功率都比较低，一般铅酸蓄电池的比能量只有40W·h/kg，且寿命较短（<1000次），因此，铅酸蓄电池电动汽车续驶里程普遍较短且车身较重。

与铅酸蓄电池相比，镉-镍蓄电池和氢-镍蓄电池具有比功率高、安全可靠等优点，在混合动力汽车上应用较多。镉-镍蓄电池含有重金属，遗弃后会对环境造成污染。（见碱性蓄电池）

锂离子蓄电池主要包括钴酸锂、锰酸锂、镍酸锂、多元复合材料、磷酸亚铁锂离子电池等。锂离子蓄电池的能量密度高（可达100～125W·h/kg），安全性好，循环寿命长（可达1000次以上），可以使电动汽车具有较远的续驶里程，因此应用较多。

超级电容器的优势是比功率高、循环寿命长，缺点是比能量低、价格昂贵，其循环寿命长达50万～100万次，与铅酸蓄电池、能量型锂离子蓄电池并联可以组成性能优良的动力电源系统。

燃料电池能量转化效率高，产物只有水，实现了污染气体和温室气体零排放或近似零排放，但氢燃料不易获取，不易储存，高温下寿命及稳定性不理想，电池成本高昂。

电机技术 电动机驱动系统是电动汽车的主要执行结构，电动机及其控制系统是新能源汽车的核心部件（电池、电动机、电控）之一，其驱动特性决定了汽车行驶的主要性能指标。对电动汽车用驱动电动机的基本要求包括：①体积小、质量轻，具备较高的功率密度；②具有低速大扭矩特性和较宽范围内的恒功率特性；③在整个运行范围内具有较高的效率；④具备高可靠性和鲁棒性；⑤可以实现制动能量回馈，具有较高的能量回收效率。

整车电控技术 见电动汽车电控系统。

充换电技术 见电动汽车充换电技术。

发展与展望 1873年，英国人R.戴维森制成第一辆有实用价值的电动汽车。1881年在法国巴黎出现了世界上第一辆以可充电池为动力的电动汽车，电池采用铅酸蓄电池。1895～1910年是早期电动汽车发展的黄金时期，因缺乏充电配套设施阻碍了其发展。

20世纪20年代以后，电动汽车由于蓄电池的能量密度低、质量大、充电时间长、一次充电的行驶里程短、行驶速度低、使用寿命短、成本高，逐渐被内燃机汽车所取代。20世纪中期以后，由于能源和环保问题，电动汽车又重新引起各国的重视，美国、日本率先开始电动汽车的研究和应用。21世纪，电动汽车已有批量生产和实际应用，发展电动汽车也已成为改善环境和解决石油危机的一项重要途径。

随着电池技术的不断进步，以及各国政府在科研、基础设施建设等方面的不断投入，电动汽车正在迅速崛起，其必将为国民经济的发展和人民生活质量的提高发挥巨大作用。

diandong qiche chonghuandian jishu

电动汽车充换电技术 （charging and swapping technology of electric vehicle） 以受控的方式将电能传输到电动汽车储能装置的措施与方法。电动汽车储能装置的

充换电过程，需考虑电网与充电装置的控制技术，以及充电装置与电动汽车动力电池管理系统的控制技术。电动汽车智能充换电站系统结构如图1所示。

分类 主要有整车充电与电池快换两种。

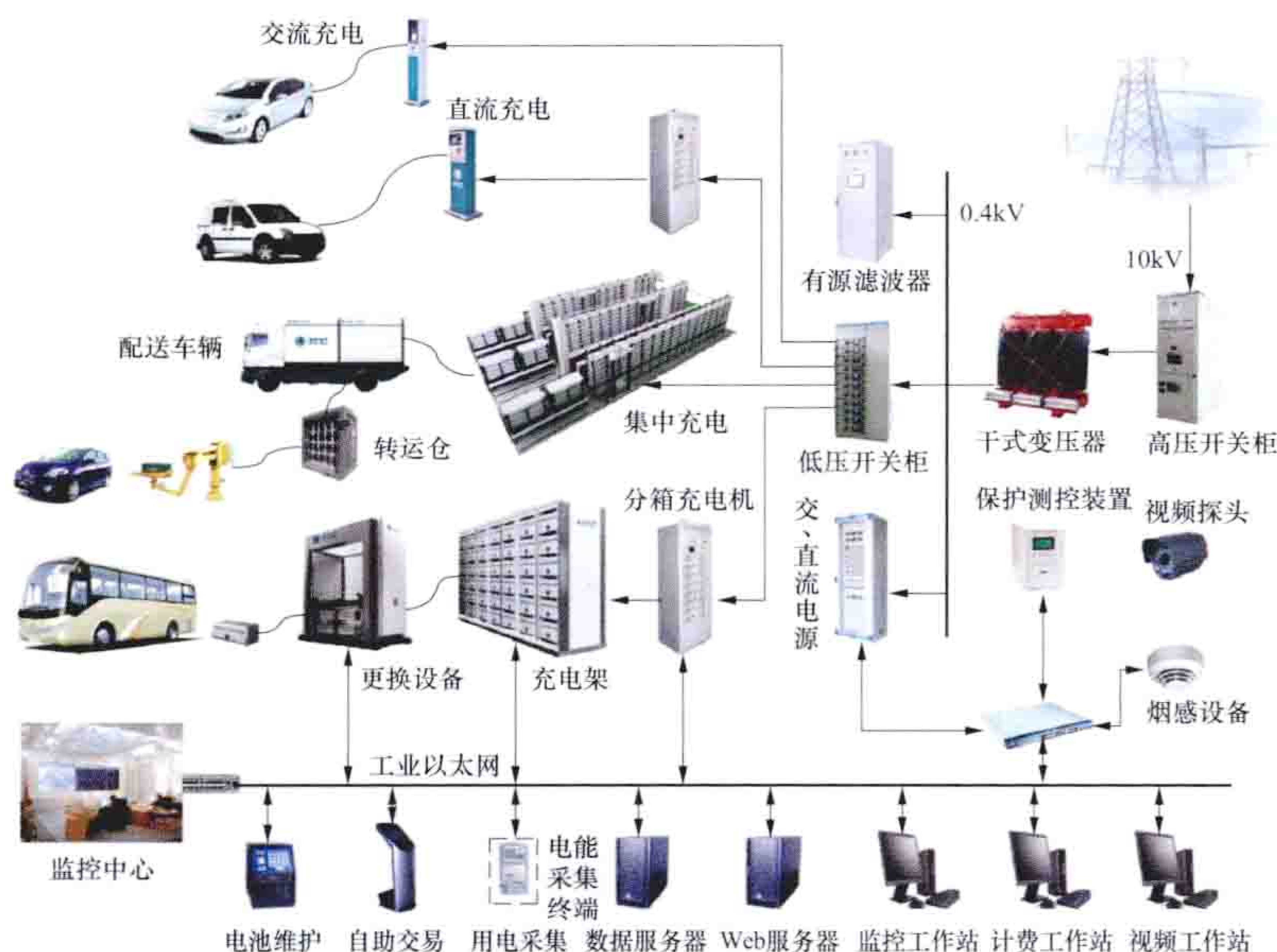


图1 电动汽车智能充换电站系统结构图

整车充电 动力电池处于“随车”状态下进行的充电，又称充电，通过电动汽车提供的充电接口，实现动力电池整体充电。整车充电具有设备简单、操作简便的特点，但充电时间较长，一般适用于晚间进行。整车充电分为传导式与非接触式两种方式。

传导式充电包括交流充电与直流充电。①交流充电额定容量一般为单相220V/32A，通过车载变流装置转换为直流电量，一次完整充电所需时间为6～8h。②直流充电又分为直流慢充和直流快充。直流慢充一般充电电流为（0.2～0.3）C（C为电池的充放电倍率，表示电池充放电时电流和容量之间的关系，如0.2C表示1A·h电池充放电电流为0.2A），一次完整充电所需时间为2～3h；直流快充的额定输出功率一般可达35～200kW，充电最大电流可达到（3～5）C，能在较短时间内完成充电，一次充电所需时间一般为20min～1h。直流快充适用于电动汽车电能临时（应急）补充，因其电流较大，可能造成对电网的冲击，并有可能对电池特性造成损害，一般应慎用。

非接触式充电主要通过电磁耦合方式完成电量传输，这种方式还处于研究阶段。

电池快换 动力电池处于“离车”状态下进行的集中充电，又称换电，是以电动汽车换下的动力电池箱为单位，实现动力电池分箱充电，再以充满电量的动力电池替换车辆上的动力电池，实现对电动汽车的快速电能补给。电池快换方式省去了整车充电方式所需的等待时间，车辆的电能补给时间大大缩短，一般在10min之内即可完成。电池快换适用于电动汽车行驶频度较高和跨区域行驶等使用工况。与整车充电相比较，电池快换有利于对电池的专业管理和维护，降低电池使用成本。但电池更换设备比较复杂，其中换电装置机械部分要求较高，需要专业维护。

主要充换电技术 包括动力电池充电过程控制技术、充换电安全技术、充电接口技术等。

动力电池充电过程控制技术 应用较多是常规的恒流与恒压控制两种模式。它是基于静态控制模型，实现恒流与恒压控制及转换，具有控制逻辑简单，软硬件实现容易等优点，但实际充电电流很难达到电池的特性要求。在常规的恒流与恒压控制方式基础上，智能化充电模式引入模糊控制理论的动态控制数学模型，根据电池不同阶段的参数变化，动态跟踪电池可接受的最大充电电流及后期充电电压变化，使得实际充电电流始终保持在最优值附近，从而保证了满足电池自身特性条件下的充电。

充换电安全技术 电池充电过程中，必须防止过电流、过电压和过温等现象发生，避免造成动力电池损坏或引起事故的发生。为此，充电安全是实现电动汽车能源补给的首要条件，动力电池充电系统必须具备过电流保护、过电压保护、过温保护、短路保护、漏电保护等保护措施，同时动力电池管理系统（BMS）应做到对电池信息的可靠采集，实时处理、准确控制。

充电接口技术 充电接口（见图2）属充电连接装置，包括供电接口和车辆接口。充电接口技术又称充电接口连接技术，包括充电模式与连接方式两个方面。①充电接口有交流充电接口和直流充电接口两种方式，其充电模式主要有电源侧直接与交流电网连接、通过专用供电设备与交流电网连接、电源侧通过非车载充电机与交流电网连接3种。前两种用于交流方式充电，后一种用于直流方式充电。②充电接口的连接方式主要有电缆与电动汽车永久连接、独立活动电缆连接和电缆与供电设备永久连接3种。



图2 电动汽车充电接口

电动汽车充换电技术标准 国际上参与电动汽车充换电设施标准制定的主要组织包括国际标准化组织道路车辆技术委员会电动道路车辆分技术委员会、电工委员会电动道路车辆和电动载货车技术委员会、欧洲标准技术委员电驱动道路车辆技术委员会、美国SAE电动汽车论坛和日本电动汽车协会等组织机构。中国汽车标准化技术委员会于1998年组建了电动车辆标准化分技术委员会（代号SAC/TC114/SC27），2001年发布了GB/T 18384—2001《电动汽车 安全要求》系列标准，2011年发布了GB/T 20234—2011《电动汽车传导充电用连接装置》和GB/T 27930—2011《电动汽车非车载传导式充电机与电池管理系统之间的通信协议》系列标准，规定了电动汽车充电安全、电气接口和充电传导方式等要求，内容涵盖了电池、充电设施、通信协议和传导接口等各个方面。

diandong qiche chonghuandian sheshi

电动汽车充换电设施 (charging and swapping facilities of electric vehicle) 为电动汽车动力电池提供能源补给服务的手段与措施。电动汽车充换电设施（见图 1 和图 2）由能量补给装置和管控平台两部分组成。

能量补给装置 包括交流充电桩（见电动汽车交流充电桩）、直流充电机、电池更换系统。①交流充电桩是为具有车载充电机的电动汽车提供交流电源的专用供电装置。②直流充电机是电动汽车实现能源补给的核心装置，分为非车载直流充电机和电池分箱直流充电机。非车载直流充电机是将电网交流电能变换为直流电能，为电动汽车动力蓄电池充电的专用装置。电池分箱直流充电机是以动力电池箱为单位进行充电，其工作方式及原理与非车载直流充电机相同。直流充电机大都采用高频开关整流技术，通常由输入滤波电路（EMI滤波器）、工频整流电路、功率因数校正电路、DC/DC变换器、输出滤波器和单元监控等部分组成。具备CAN接口与电池管理系统通信，获取电池箱参数及充电电池的状态参数，输出相应功率。具有完善的保护功能，包括输入欠电压、缺相检测、输出过电压、输出过载、温度保护、防雷、接地等保护。③电池更换系统是以整车动力电池箱为单位对电动汽车动力电池进行更换，通常由更换设备、电池储存架与辅助设施组成。电池更换时间要求一般为：乘用车不宜大于 5min，商用车不宜大于 10min。



图 1 电能量补给装置和管控平台组成的换电设施

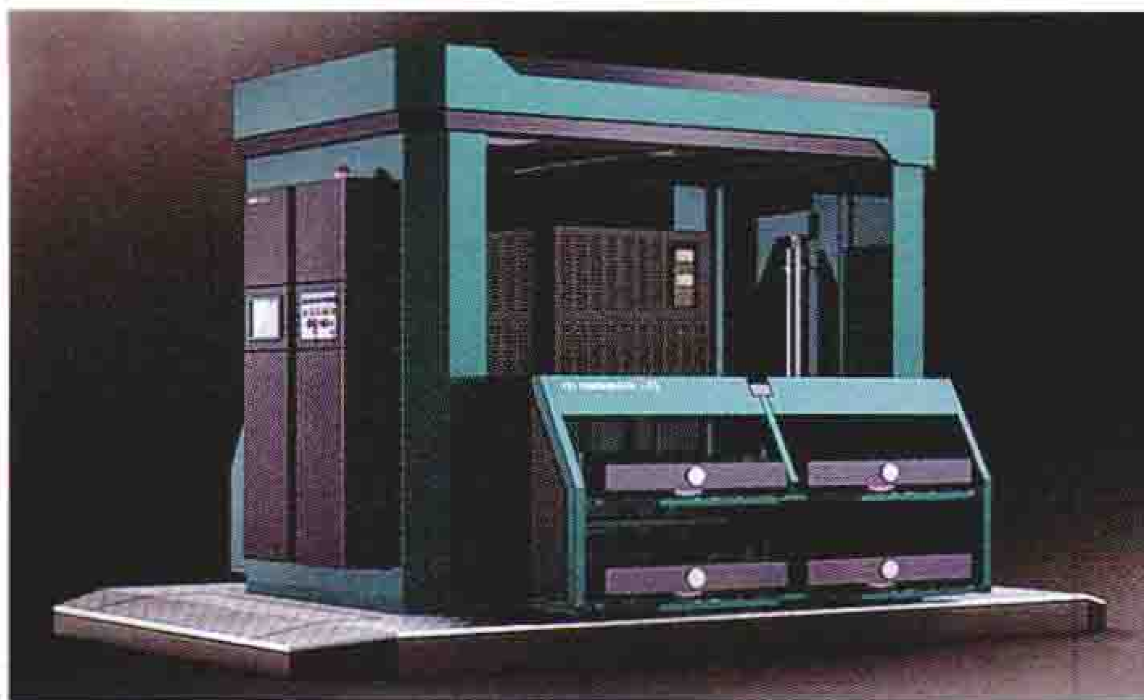


图 2 商用车换电设施

管控平台 由站内监控系统和计量计费系统组成。站内监控系统包括供电监控、充换电监控和安防监控三部分，实现对供电状态、站内设备运行状态、工作场所环境等信息采集、处理、控制和设备运行管理。其中充换电监控是管理平台的核心，主要任务是实时监测电池充电过程，控制充电机的输出功率，管理电池的使用。计量计费系统负责对站内充换电的电能计量和结算，主要由电能计量表和相应计费软件构成。电动汽车充换电管控平台基本组成如图 3 所示。

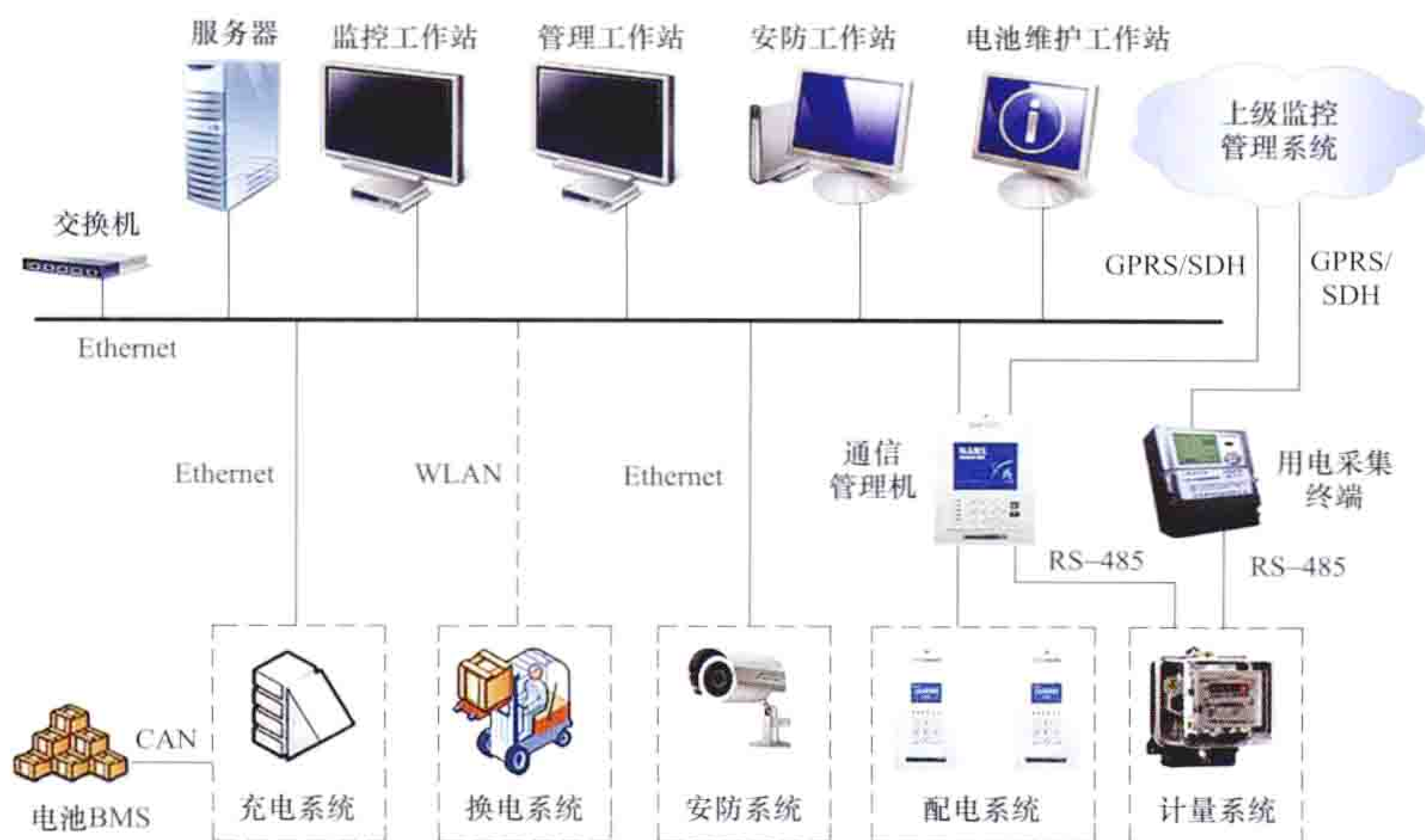


图 3 电动汽车充换电管控平台基本组成

diandong qiche chonghuandianzhan

电动汽车充换电站 (charging and swapping station of electric vehicle) 为电动汽车动力电池提供电能补给的服务场所，是电动汽车基础性配套设施。电动汽车作为一种新的运输载体，无论是在续驶里程方面，还是在动力电池储能能源补给特性方面，与传统燃油车存在较大差异。针对不同工况条件下需要不同能源补给方式的要求，充换电站必须具备向电动汽车提供多样化能源补给服务的功能要求，备有交直流结合、充换结合和快慢结合的灵活多样的充电方式。



图 1 电动汽车充换电站

电动汽车充换电站（见图 1）一般由功能服务区和充换电服务设施两部分组成。

功能服务区 主要有供电区、充电区、电池更换区、电池检测维护区、监控区、综合管理区等，其中综合管理区一般包含营业室、值班室、工作人员办公区等。①供电区安装电源设施，为站内各类设施提供工作电源，主要包含电源变压器、开关柜、无功补偿、有源滤波等装置；②充电区为电动汽车动力电池提供充电服务，由电动汽车交流充电桩、非车载直流充电机和电池分箱充电机构成；③电池更换区为电动汽车提供电池箱更换，包括自动、手动及半自动等多种方式换电装置；④电池检测维护区提供对电池箱和单体电池工作特性的检测，主要检测电池充放电电

压/电流、内阻和绝缘性能；⑤监控区负责站内设备的工作状态监控和充换电业务管理；⑥综合管理区主要用于电动汽车充换电配套的辅助服务，包括充换电业务受理与站内办公区等。电动汽车充换电站功能区域示意图如图2所示。电动汽车充换电站区域如图3所示。

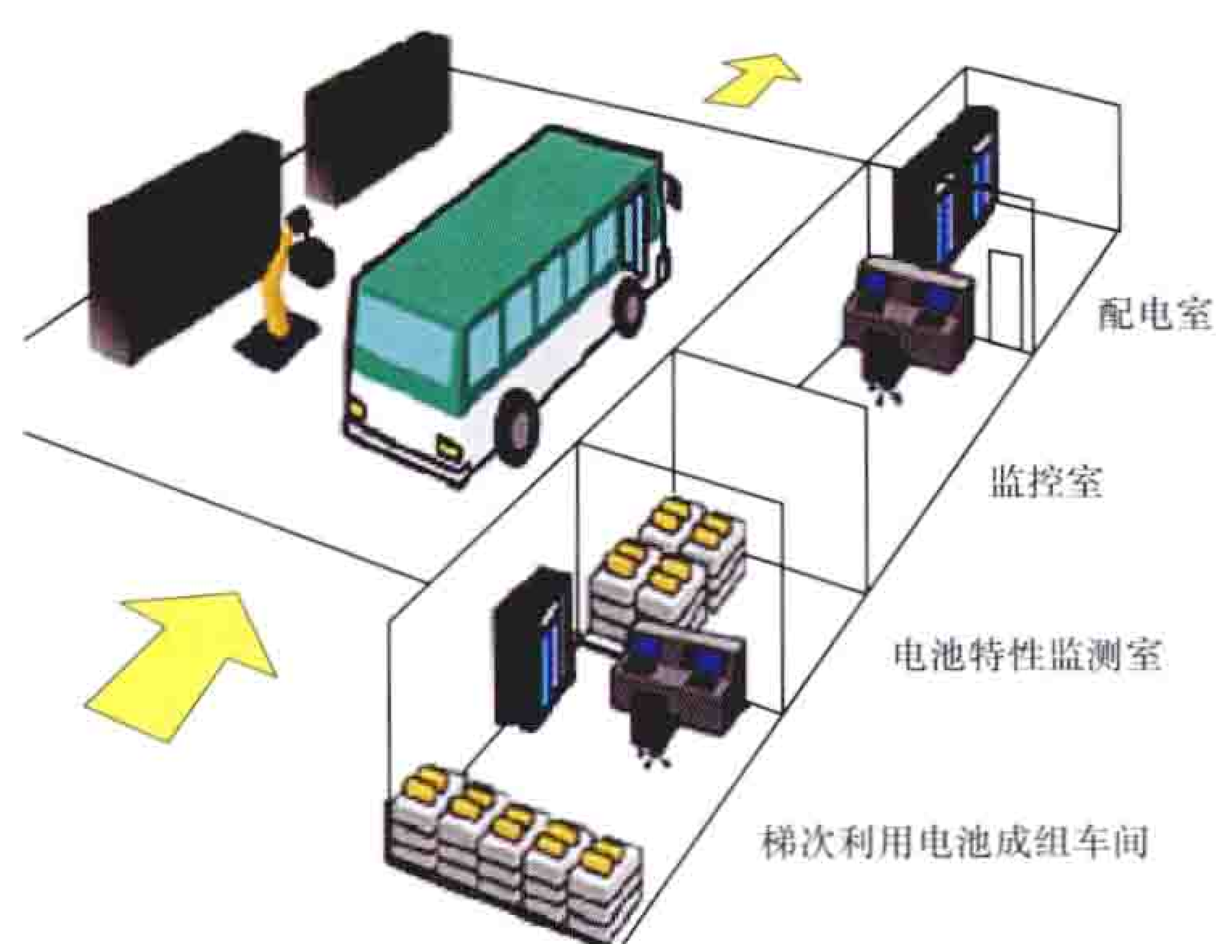


图2　电动汽车充换电站功能区域示意图

充换电服务设施　主要有交流充电桩、非车载直流充电机、电池分箱充电机、电池更换装置、站内监控系统和计量计费系统等设施。(见电动汽车充换电设施)



图3　电动汽车充换电站换电区域

电动汽车充换电站一般有电池充换电站、电池集中充电站和电池配送站3种类型。①电池充换电站是采用整车充电或电池更换方式，为电动汽车提供电能补给的服务场所；②电池集中充电站是为动力电池集中进行充电，并为电池配送站提供动力蓄电池的服务场所；③电池配送站是通过配送方式获得动力蓄电池，并为电动汽车提供电池更换服务的场所。

diandong qiche diankong xitong

电动汽车电控系统　(electrical drive control system for electric vehicle)　用于实现电动汽车正常运行的电力拖动及控制等电路组合的整体。电动汽车作为一种露天运行、结构紧凑、具有车载能源的交通工具，其运行工况十分复杂：既要能高速飞驰，又要能频繁起制动、上下坡、快速超车、紧急刹车；既要能适应雪天、雨天、盛夏、严冬、雪后撒盐等恶劣天气条件，又要能承受道路的颠簸振动，还要保证司乘人员的舒适与安全。汽车的载重、路面状况均会影响到电动机负载转矩的大小变化，而载重的变化还会影响到系统的等效转动惯量，进而影响到电动机的响应速度。

电动汽车对电控系统的要求　包括：①基速以下大转矩以适应快速起动、加速、负荷爬坡、频繁起停等要求，基速以上小转矩、恒功率、宽范围以适应最高车速和公路飞驰、超车等要求，并要求具有一定的短时过载能力。典型的电动机外特性控制要求如图1所示。②整个转矩/转速运行范围内的效率最优化，能够通过再生制动回收电能，尽量延长电动汽车的续驶里程。除电池技术外，降低电控系统的损耗也是重要的一环。③电动机及控制器结构坚固、体积小、质量轻、免维修或少维修、抗颠簸振动，噪声低。④操纵性能符合驾驶员驾驶习惯，运行平稳、乘坐舒适，电气系统故障诊断、失效保障措施完善。⑤具有抗电磁干扰的能力。

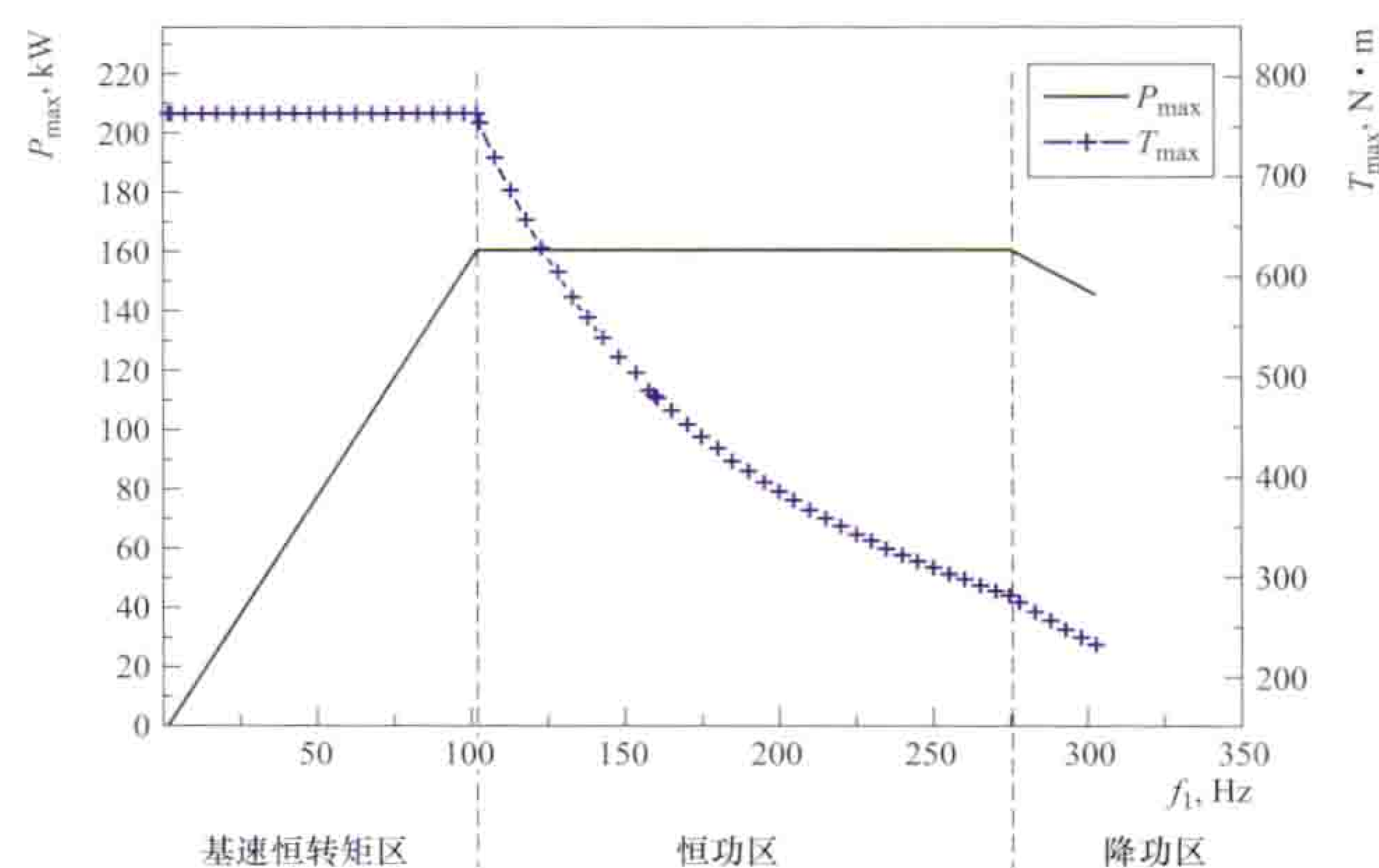


图1　典型的电动机外特性控制要求

结构　电动汽车电控系统包括电力驱动控制系统、电池及电池管理系统(battery manage system，BMS)、整车控制器(vehicle control unit)三大部分，其中电力驱动控制系统是最关键的部分。除此之外，还有与普通燃油汽车基本一致的部分，如电动助力转向系统、门窗座椅控制系统、车载空调影音系统等。纯电动汽车的电控系统结构如图2所示。

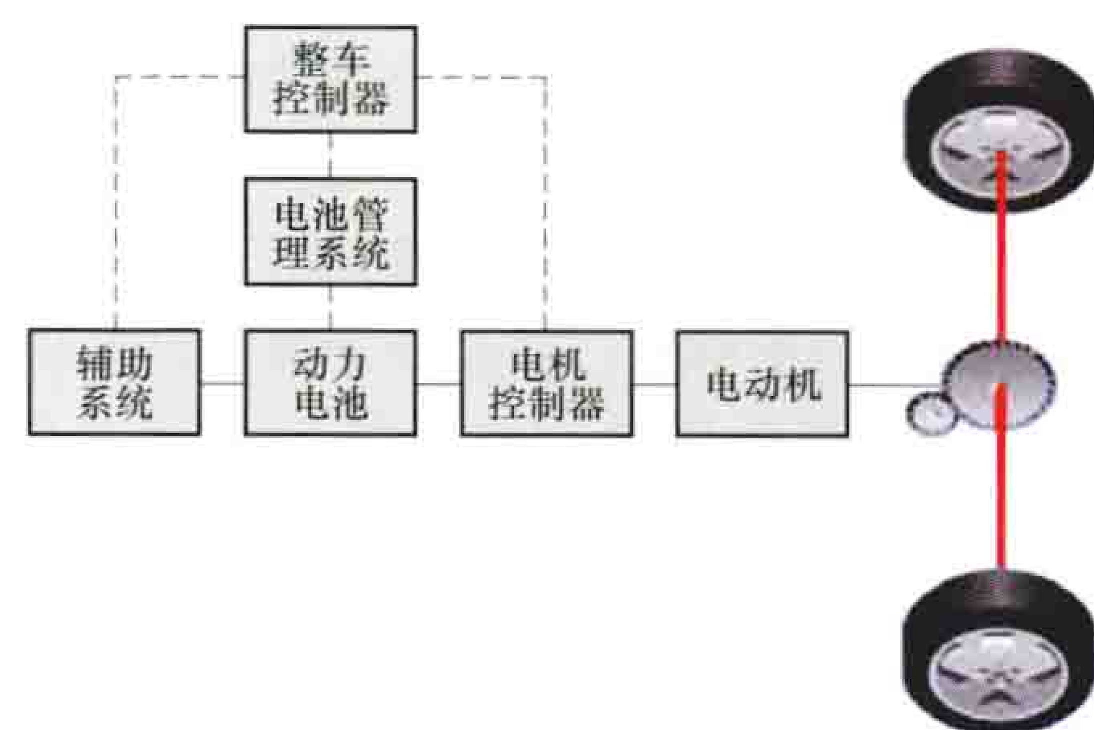


图2　纯电动汽车电控系统结构框图

电力驱动控制系统　包括电动机及电机控制器，相当于传统燃油汽车中的发动机，为汽车提供动力。电动汽车电力驱动技术通常涉及电机、电机控制器技术。

(1) 电机。作用是将电机控制器提供的电能转换成机械能，以机械转矩的形式，从电动机转轴上输出动力，并通过减速器等传动机构将动力输送到驱动轮上，从而驱动汽车行驶。相对于内燃机而言，电动机转矩的输出更为迅速、精确，同等装车条件下噪声通常也比内燃机低。

电动汽车用驱动电动机有直流电动机和交流电动机两大类。

直流电动机具有优良的电磁转矩控制特性，特别是低速性能好，控制简单。早期的电动汽车常使用直流电动机。由于其技术门槛低，常用于简易的电动汽车。直流电动机通常质量大，维护困难(电刷是其薄弱环节，需要经常维护)，

其旋转部分的惯性是相同容量交流电动机的3～5倍，对于需要频繁加减速的汽车来说，在加减速时回转部分的惯性将使能量消费大，大型电动汽车上较少使用。直流传动电控系统已经逐步被交流变频电控系统所取代。

交流电动机常用异步电动机或永磁同步电动机，也有用永磁无刷电动机和开关磁阻电动机的。

异步电动机结构简单、坚固耐用、价格便宜、维护方便，容量也可以做得比较大，在工业中应用极为广泛。以前的调压、串电阻等异步电动机调速方式，性能差、效率低，在一定程度上限制了异步电动机在高性能调速场合的应用。随着矢量控制和直接转矩控制等高性能变频调速方法的提出，异步电动机的调速性能也能做到和直流电动机一样优良，在不少应用场合有取代直流调速系统之势。在电动公交车等功率等级较大的应用场合多使用异步电动机，欧美的电动汽车中也多倾向于使用异步电动机。

永磁同步电动机的优点是功率密度高、体积小、质量轻、效率高，且控制相对容易，因而在电动汽车驱动系统中占有重要位置。永磁同步电动机多用于电动轿车或串联式混合动力汽车。日本的电动汽车上大多使用永磁同步电动机或无刷直流电动机。电动汽车用永磁同步电动机容量都不大，通常在几十千瓦左右，最大功率可以达到100kW左右。永磁电动机在高温下有退磁的危险。

开关磁阻电动机结构简单、坚固、启动性能好、无大电流冲击、效率高、调速范围宽。其缺点是在低速时存在严重的转矩脉动，并因此导致电动机振动和音频噪声等不良后果，在电动汽车中的应用受到一定程度的限制。

交流电动机驱动系统因其在成本、可靠性、制造工艺等方面的优势和优良的性能，已成为电动汽车驱动系统的主流。

（2）电机控制器。其主要功能包括：①与整车控制器通信；②将来自电池或发电机的不可控电能按照整车控制器的指令要求，通过电力电子器件的开关动作，变换成可控的电能，提供给电动机。通过逆变器输出电压幅值和频率（对交流电动机控制系统）的调节，实现对电动机转矩的精确控制。

电机控制器通常由电力电子器件组成的主电路、驱动电路、控制电路等组成，其中控制电路通过电压、电流传感器以及位置/速度传感器采集相关的物理量，从油门/刹车踏板或整车控制器得到转矩指令，经过闭环调节器产生电压指令，发出PWM信号控制器件的导通与关断。由于处理器技术的发展，除了部分低成本的直流电动机控制系统外，通常电动汽车电动机控制系统均为数字控制。

电池及电池管理系统　为电动汽车提供能量的储能装置，是影响电动汽车整车性能的一个关键因素，也是制约电动汽车产业化进程的主要瓶颈。动力电池通过电机控制器为电动机和辅助系统供电，其性能的优劣对续驶里程、加速性能和最大爬坡度等性能都会产生直接影响。电池管理系统的作用通常包括：①对电池进行实时监控，采集电池充放电过程中的电池电压、电流和电池温度，监控电池的工作状况并进行故障诊断，避免出现过放电、过充、过热和单体电池之间电压严重不平衡现象，以便最大限度地利用电池的存储能力和循环寿命；②平衡电池组中各电池单体的功率；③控制单元通过采集到的充放电电流参数预测剩余电量，同时利用从总线上接收的车速信息估算剩余里程，并把估算结果通过总线发送到仪表显示单元。

整车控制器　主要负责整车能源分配与控制、各零部件之间的通信、安全保障等。整车控制器作为电动汽车电气控制的上层管理单元，负责与电动汽车上电池管理系统（BMS）、电机控制系统（MCS）、电动助力转向系统、电子刹车系统、空调暖风系统、DC/DC转换系统、车载充电机等各子系统或零部件之间的协调控制。主要功能包括：①接收、处理驾驶员的驾驶操作指令，并向各个部件控制器发送控制指令，使车辆按驾驶期望行驶。模块直接采集挡位信息、钥匙开关状态、油门踏板开度及制动踏板开度，并据此确定电动机的输出转矩。②与电机控制器、充电机、电池管理系统等进行可靠通信，通过CAN总线（以及关键信息的模拟量）进行状态的采集输入及控制指令量的输出。③系统故障诊断。对油门踏板、制动踏板、真空传感器进行故障诊断，并将诊断信息通过CAN总线发送给仪表进行显示。④对整车具有保护功能。视故障的类别对整车进行分级保护，紧急情况下可以关掉发电机及切断母线高压系统。⑤协调管理车上其他电气设备，根据系统所处的状态给各个负载上电或断电。⑥人性化的PC机监控界面，实现数据的分析和数据库管理，实时监控通信数据、各类输入和输出变量、关键中间变量、故障源与故障级别等。

diandong qiche jiaoliu chongdianzhuang

电动汽车交流充电桩　（AC charging pile of electric vehicle）　采用传导方式为具有车载充电机的电动汽车提供交流电源的专用供电装置。与一般的交流电源插座相比，交流充电桩具有计量计费、交流输出控制、信息交互和通信等功能。按安装方式，交流充电桩分为落地式和挂壁式两种，落地式（见图1）一般用于户外使用，挂壁式（见图2）一般用于户内使用。按充电方式，有一桩一充和一桩多充（两个以上充电口）等形式。



图1　落地式交流充电桩


图2　壁挂式交流充电桩

电动汽车交流充电桩一般由桩体、充电插座、保护控制装置、计量装置、读卡装置、人机交互界面等组成。其基本工作步骤为：①通过人机交互界面进行用户身份识别，有效者可进入工作状态。②选择并确认充电方式（定时、定量和自动充满等），交流充电桩启动接通电源，进入充电状态。用户可通过显示界面观测充电过程相关信息。

电动汽车交流充电桩的主要功能：①运行状态、充电电量、计费信息等的显示。②通过内置交流电能表对交流充电桩输出的电能量进行计量。③具有与上级监控管理系统的信息双向交换功能。

diandongxu

电动序 (electromotive series) 以标准氢电极的电极电位为零作为参比标准，测得各种化学物种（原子、分子、离子）的电极电位，按由小到大的次序排列成的序列表。常见金属（包括氢）的电动序是：K、Ca、Na、Mg、Al、Zn、Cr、Fe、Cd、Co、Ni、Sn、Pb、H、Cu、Hg、Ag、Au。其中钾的电极电位最小，金的电极电位最大。一般情况下，位于氢以前的金属能从酸中置换出氢，在氢以后的则不能。例如，锌能从酸中置换出氢，而铜不能。位于序列前面的金属能把后面的金属离子从它的盐溶液中置换出来，如锌能从硫酸铜溶液中置换出铜。

diandu dianfei

电度电费 (energy charges; kilo watt-hour charges) 用户承担电力生产成本中变动成本部分的电费，又称电量电费。不论是执行两部制电价还是单一制电价，电度电费都是按实际用电量计算的。

有功电量的计算 有功电量是按照在用户处安装的计费电能计量装置中有功电能表读数为基数计算的。由于电能表计数是累计值，因此在计算一个规定期限内的用电量时，应为期末读数与期初读数之差。在电能计量装置中装有电流互感器和电压互感器时，还要分别乘以电流互感器和电压互感器的变比。电流互感器（或电压互感器）的变比为电流互感器（或电压互感器）一次绕组与二次绕组的额定电流（或电压）的比值。

电度电费的计算 按照执行电价的不同，电度电费的计费方式有单一制电价计费、分时段电价计费、阶梯电价计费和阶梯与分时混合的计费方式。①单一制电价计费，有功总电量乘以电价；②分时段电价计费，各不同时段的电量乘以相应电价的电度电费之和；③阶梯电价计费，按阶梯分档的用电量乘以相应电价的电度电费之和；④阶梯与分时混合计费，同时按照时段和阶梯分档计算的电度电费之和。2012 年 7 月，国家发展和改革委员会在中国全面试行居民阶梯电价政策，其中上海、福建、浙江、甘肃等省份实行阶梯分时混合计费方式。

对高压供电用户，当贸易结算电能计量装置安装在其专用变压器低压侧时，应将用户专用变压器的铜铁损电量中的有功损耗电量部分计入用电量之内再计算电度电费。

diandu

电镀 (electroplating) 利用电化学方法在导电固体表面沉积一层薄金属、合金或复合材料的过程，是一种特殊的电解过程。电镀的原理是以镀层金属为阳极，以镀件为阴极，以含有镀层金属盐的水溶液为电镀液（电解液），通直流电进行电解。阳极金属不断溶解，在阴极镀件表面析出，形成均匀、致密、结合良好的金属或合金镀层。镀层金属有铜、镍、铬、锌、铜锌合金、铜锡合金等。镀件多为金属（见图），也可为非金属，如塑料、木材、玻璃、皮革等。除常规电镀外，为改善镀层质量，复合电镀、脉冲电镀也有很大发展。镀层的作用是装饰或/和防腐蚀，在工业上则用来增加金属零件、部件的耐磨性，防腐蚀，修补磨损件，增加导电性和钎焊性能等。



利用电镀工艺制成的首饰、手表（胡顺增　摄）

金属镀件的电镀 为获得良好的镀层，应选择好镀层、电镀方式，配制电镀液，进行镀前表面处理，控制工艺条件，最后对镀层进行检测。

镀层选择 应根据镀件的用途、材料性质、使用条件等确定镀层的种类和厚度。镀层一般可分为防护性、防护-装饰性、功能性镀层等 3 种。

防护性镀层主要用于保护金属表面，防止腐蚀或增加耐腐蚀性，镀锌层、镀铬层、锌基合金镀层等属于此类用途，镀层厚度 6～24μm。

防护-装饰性镀层主要用于既要防腐蚀又要求具有经久不变的外观的零件，如铜-镍-铬多层电镀是典型的防护-装饰性镀层，镀层厚度 0.3～24μm。

功能性镀层是为了满足某种物理性能的需要（如光、电、磁、热、耐磨性等）而沉积的镀层。例如，机械零件表面镀硬铬层可以提高耐磨性，镀铅基合金镀层可增强镀件的耐疲劳性，镀锡基合金镀层可增加耐磨和耐腐蚀性，镀铜、锡、锡镍、铅锡合金可提高镀件的导电性和钎焊性。功能性镀层厚度为 4～24μm 或更厚。

电镀方式选择 应根据镀件的尺寸、形状等确定电镀方式。较常用的电镀方式有挂镀、滚镀、连续镀、刷镀等。

挂镀是将镀件固定在挂具上进行电镀，适用于较大零件。

滚镀是将零件装入带孔的、可转动的圆筒中，在电镀液中翻滚电镀，适用于小零件的电镀。

连续镀可以使线材和带材镀件连续通过镀液，并在镀液中可靠地接触阴极进行电镀。

刷镀则用于不能浸入镀槽或只需在局部进行电镀的镀件。以镀件为阴极，以镀层金属制成可移动的阳极（刷笔），用纤维材料包在刷笔上并吸满镀液，在镀件上需要电镀的地方进行刷镀。

电镀液配制 普遍使用含有镀层金属盐的水溶液作电镀液。当镀层金属电极电位较负，在阴极析出受到氢离子限制时，可用熔盐或有机电镀液。电镀液的功能：①供给沉积在阴极的镀层金属离子；②增加电镀液的电导；③防止阳极钝化；④pH 值适当，防止氢的析出；⑤改善镀层质量。

电镀液的配制十分复杂，不同的镀层金属有不同的配制方法，同一种镀层金属也因对镀层性能要求不同而有不同的配制方法。大部分配方中含有的氰化物，是环境的污染源。通常在电镀液中加入络合剂以形成络离子，改善镀层金属结晶的致密度；加入有机物添加剂，如光亮剂、整平剂等，以改善镀层质量。

镀前表面处理 镀前表面处理对保证镀层质量十分重要，通常包括磨光、除锈、除油污、水洗等操作，以保证镀件表面光洁、干净。

工艺条件控制 影响电镀过程的主要因素有电镀液的离子浓度、pH 值、温度、流速、阴极电流密度等。

离子浓度大时，可提高电镀液的导电性和阴极电流密度，有利于镀层的均匀性，但浓度过大时会形成粗晶的镀

层；离子浓度小时，极化作用变大，镀层晶粒细致、均匀，但浓度过小时，易形成海绵状镀层。络合剂和添加剂可以增加或降低金属离子的浓度。

pH值是电镀液的重要条件之一。镀层金属不同，要求的pH值也不同。pH值小时，容易析出氢气而降低阴极电流效率。通常加硼酸、醋酸钠等缓冲剂以维持一定的pH值。

温度对电镀的影响比较复杂，电镀液温度高时会降低阴极极化，并加速晶核的生长，促使形成粗晶的镀层，镀层硬度低，均匀性差，但温度高能增加金属盐的溶解度，防止阳极钝化，便于提高电流密度，降低电镀液的黏度，减少吸附氢气的可能性，减轻镀层的内应力，并强化生产。

增加电镀液的流速可以减少扩散层的厚度，提高金属离子的迁移速度，提高临界电流密度，迫使附着在镀件上的氢气逸出，避免在镀层上出现气泡。

阴极电流密度是极为重要的电镀条件。电流密度大可缩短电镀时间，所产出的晶核数目较多，有利于获得较精细的电镀层，有利于抑制氢气的析出，镀层的均匀性也较好。但电流密度过大时，电流效率降低，有产生海绵状镀层的危险。

镀层检测 包括外观检查，厚度、针孔度、耐腐蚀性、附着强度、硬度检测以及对特殊要求如色泽与光亮、耐磨性、减磨性、可焊性的检测。除外观检查外，多数检测项目需要用物理法或化学法来完成。

非金属镀件的电镀 需要先在其表面沉积一层导电金属，再按金属镀件进行电镀。

用机械或化学方法将镀件表面粗化，以增加接触面，然后浸入还原性溶剂中使其表面吸附还原剂（称为敏化），再浸入含有贵金属离子如Ag^+或Pd^{2+}的溶液（称为活化），活化剂被还原成晶核附在镀件表面，为电镀金属层打下基础。

电镀陶瓷玻璃制品时，还可将氧化银和其他物质混合，制成银浆，涂在镀件表面，经高温处理，氧化银分解成金属银层。这种方法称为渗银。

复合电镀 在沉积镀层金属的同时，将需要的复合材料的颗粒借吸附作用也沉积在镀件上，又称分散电镀。将固体微粒均匀分散在电镀液中，制成悬浮液进行电镀，使其与电镀基质金属共沉积，从而获得具有耐磨、自润滑、耐蚀、装饰、电接触等功能镀层。上述固体微粒通常为各种难熔的氧化物、碳化物、硼化物、氮化物等。电镀基质金属有镍、铜、铬和一些合金。

脉冲电镀 利用脉冲电流进行电镀，以改善镀层的表面状态。脉冲电镀是使电镀回路周期性地接通和断开，或者在固定直流上再叠加某一波形脉冲的电镀方法。与普通电镀相比，这种方法具有镀层平整致密、附着性好，电流效率高，环保性能好等优点。在一般的研究和应用中，脉冲电镀所使用的脉冲方式可分为单向脉冲和双向脉冲两种，使用的脉冲波主要是矩形波和正弦波。用直流电电镀时，在阴极和溶液界面处形成较厚的扩散层，使阴极表面金属离子浓度降低产生浓差极化，限制了电沉积的速度，使用较大的电流密度不但不能提高镀速，反而使阴极上的氢气析出量增加，电流效率降低，镀层质量变坏，出现氢脆、针孔、麻点、烧焦和起泡等现象。脉冲电镀由于有关断时间，被消耗的金属离子利用这段时间扩散补充到阴极附近，当下一个导通时间到来时，阴极附近的金属离子浓度得以恢复，故可以使用较高的电流密度。脉冲电镀峰值电流可以大大高于平均电流，促使晶种的形成速度高于晶体长大的速度，使镀层结晶细化，排列紧密，孔隙减少，硬度增加。

沿革与发展 1803年，法国人L.布鲁尼亚泰利（L. Brugnattlli）利用伏打电堆进行了银片上镀金的试验。1836年，德国人M.H.雅科比（M. H. Jacobi，1801—1874）发明了电镀技术，不久电镀各种金属镀层的技术相继发明。1840年，英国人J. B.埃尔金顿（J. B. Elkington）兄弟获得氰化镀银专利并创办电镀工厂进行镀银茶具、发饰、餐具、灯饰等的生产，这是电镀工业开始的标志。1873年，美国人E.威斯顿（E. Westone）开发了用于电镀的直流发电机，促进了电镀工业的快速发展。1960年，美国研究成功在非金属塑料上电镀的新工艺。1967年无氰电镀得到推广。随着人类环保意识的增强，人们开始研究气相电镀以解决电镀废水、废液排放造成的环境污染问题。全自动电镀也有很大发展。全自动电镀的镀件悬挂在传送带上，在PLC与触摸屏或电脑控制下，依次通过清洗槽、水洗槽、电镀槽等得到成品镀件。

参考书目

冯立明，王玥．电镀工艺学．北京：化学工业出版社，2010.

dianfei guanli

电费管理 （electricity charges management）

按照国家批准的电价，依据用户实际用电情况和电能计量装置的记录计算电费，并按期回收电费的活动。电费管理是供电企业经营管理的重要环节，也是营业管理的主要工作，包括抄表、核算、收费和综合统计等既相对独立又互为交叉的工作内容。电费管理已实现了网络、通信和计算机技术的普遍应用。

抄表 定期抄录与用户贸易结算用电能计量装置读数，并核对与计费有关的电能表及其附属设备的接线、封印和运行情况。主要内容包括抄表周期、抄表日期、抄表方法。

抄表周期一般为1个月。在英国、澳大利亚等国也有2个月（称隔月抄表）或更长时间抄一次表，中国部分地区对居民用户的抄表周期也为2个月。少数国家也有根据供用电合同的约定，实行按月电量划拨电费，年终一次抄表结算的办法。

抄表日期一般根据抄表周期确定，也称抄表例日。在中国，对中、小电力用户一般采取按用户数量、地址编排抄表路线，对每一用户以固定日期（遇周休、节假日顺延）进行抄表；对大电力用户安排在月末抄表。大电力用户还按用电量大小分零点表和月底表两种情况，零点表在次月第一天零点抄表；月底表一般在每月25日以后抄表。

抄表方法主要有现场手工抄表或用抄表微机抄表、电话口述抄表和远程遥测抄表4种。现场手工抄表或用抄表微机抄表是大部分国家对中、小电力用户和居民用户抄表的主要方法。电话口述一般仅对距离较远的大电力用户使用，采用这种方式抄表需定期赴用户处核对。远程遥测抄表是利用各种通信通道远方遥测表计信息进行抄表。在中国的大部分地区已实现远程对用电容量为315kV·A及以上电力用户的抄表；对低压用户及居民用户的远程集中抄表也已在大部分地区推行。

韩国、日本、西班牙等一些国家的电力公司，对低压用户采取与专业性抄表公司（关联公司）签订合同，委托抄表

公司抄表的方法，使传统的抄表工作以社会化服务方式进行。

核算　对抄表读数复核后根据合同确认的容量及电价进行电费计算，并对电费计算结果进行校核处理。过去这项工作都是用人工手算的方式进行。20世纪60年代以后，世界一些电力公司的电费核算工作逐步被计算机取代。中国从20世纪80年代起，在电费核算工作中开始使用计算机，21世纪以来，随着营销信息化的普及，除少数边远地区外，已经全部使用网络、通信和计算机信息技术，实现了电费计算、校核、发行、用户电费查询等服务项目的自动化。

收费　世界大多数国家一般都以银行划拨、信用卡、储蓄付费、电话支付、电子货币付费、通过互联网付费等方式进行电费收费。中国的大电力用户一般都采用通过银行每月分若干次划拨，月底结算的办法；对中、小电力用户和居民用户，一般采用委托银行代收、电费储蓄、设站坐收、派员分区固定日期坐收、派员至用户处走收等办法；在郊县农村，一般采用农村供电所（农村电管站）或信用社代收的办法。电费充值卡、自助缴费终端、互联网缴费等收费方式正在推广使用中，传统的走收和坐收电费的办法正在逐步被淘汰。

综合统计　按照国民经济行业用电分类，将抄表、核算、收费的各项数据进行分项分类综合统计，作为销售成本分析、利润分析、需求用电分析与负荷预测等项工作的基础。

见《综合卷》电价。

dianfei hesuan

电费核算　(account and check for electricity charges)

对电量及电费进行核查、计算、复算及审核。电费核算是对抄表读数进行复核后，根据供用电合同确定的用电容量及电价进行电量及电费计算，并对电费计算结果进行审核处理的过程，也是电量电费发行前的最后一个检验环节。

电费核算的主要内容包括：①对抄表读数及异常问题进行审核；②对电量及电费进行计算；③对电量电费计算结果进行审核并对异常情况进行处理；④对电量电费差错进行处理；⑤审核完成后进行电量电费发行；⑥电费计算参数的日常维护管理。

dianfei jifei fangshi

电费计费方式　(electricity charging mode)

计算电费的方法与形式。世界上大多数国家的电费计费方式基本相同，计费周期基本都是按月，计费方式一般都分为单一制计费方式和两部制计费方式两种。不同的电费计费对象，以及与之相对应的用电类别和用电容量等都是确定电费计费方式的主要因素。

单一制计费方式和两部制计费方式的电费计算方法、销售电价结构和水平有所不同。在中国，一般对受电变压器总容量在315kV·A及以上的工业生产实施两部制计费方式；容量在100kV·A（或kW）及以上的用户还需执行功率因数调整电费和丰枯、峰谷电价制度。2005年，国家发展和改革委员会颁布了《销售电价管理暂行办法》，将实施两部制计费方式的范围扩大到工商业及其他用户中受电变压器容量在100kV·A或用电设备装接容量100kW及以上的用户。2013年，国家发展和改革委员会规定，在5年内逐步完成销售电价的分类结构调整，将中国现行销售电价逐步归并为居民生活用电、农业生产用电和工商业及其他用电三个类别。居民生活用电、农业生产用电、工商业及其他用电受电变压器容量在100kV·A以下的实行单一制计费方式；受电变压器容量在100kV·A及以上的实行两部制计费方式。

单一制计费方式　按抄见的有功电量计算电费，不考虑其用电设备容量、使用天数和设备同时率等因素。实施单一制计费方式的用户电费全部由电度电费组成，可采用分时段电价计费、阶梯电价计费或阶梯与分时混合计费的方式计算电费。单一制计费方式计算电费的方法简单，但对用户用电方式的鼓励和约束作用有限。

两部制计费方式　分别按用电容量和用电量两部分来计费的电价制度。实施两部制计费方式的用户电费由基本电费、电度电费组成，其中基本电费是用户不论实际是否使用电能都需要承担的电费。基本电费的计算有两种办法，一种是按用电最大需量计算，另一种是按用电容量计算（见基本电费）；电度电费按抄见的有功电量计算；两部制电费计费方式计算电费的方法较为复杂，但有利于促使用户提高设备利用率，减少不必要的设备容量，降低电能损耗，提高负荷率。

见《综合卷》电量制电价、两部制电价。

dianfei shoujiao

电费收缴　(collection of electricity charges)

缴纳和收取电费的过程。电费收缴是电费管理中抄、核、收工作的最后一个环节，电费收缴的方式依据供用电合同或电费结算协议的约定确定。

中国的电费收缴方式主要有坐收、走收、代收、代扣、特约委托、（预）购电、充值卡缴费、自助缴费等。①坐收是供电企业在营业厅内设置收费柜台收取电费；②走收是供电企业收费人员到用户现场或用户附近设置的收费点收取电费；③代收是通过银行或超市等代为收取电费；④代扣是由银行根据供电企业提供的电费信息从用户账户上进行电费扣款；⑤特约委托是根据供电企业、用户及银行三方签订的电费结算协议，由银行从用户的银行账户上进行电费扣款；⑥（预）购电是用户持电卡购电，通过读写卡器将其购买的电量和电费信息写入电卡，再将电卡插入电能表中方可用电的预付电费方式；⑦充值卡缴费是用户购买一定面值的电费充值卡后通过电话、网站、柜台等渠道缴纳电费的方式；⑧自助缴费是通过公共场所设置的供电企业授权或设置的自助缴费终端（见图）进行缴纳电费的方式。



电费自助缴费终端

dianfei tuibu

电费退补 (refund and complement for electricity charges) 供电企业向用户退减或追加电量电费的工作。电费退补分为政策性退补和非政策性退补，一般发生在电量电费发行并已向用户收取电费之后。

政策性退补 根据政府调价文件，确定执行政策性退补的用户及退补时间段，按照已发行容量（需量）和电量及调整后的电价进行退补电费计算。政策性退补一般因国家电价政策变动引起，不涉及对用户档案信息及抄表示数的调整，只涉及因政策引起的电价调整和退补时间范围。

非政策性退补 根据从出现差错之日起到发现差错之日止，确定非政策性退补的用户及退补时间段，计算退补电量及电费。非政策性退补的原因主要有用户档案信息错误、计量装置失准、抄表差错、电费计算差错、窃电、违章用电等，因退补发生的原因不同可能涉及用户档案、电能计量、抄表示数、电价等信息的调整。

dianfei weiyuejin

电费违约金 (penalty for electricity charges) 用户超过规定期限交付电费时，应向供电企业交付延期付费的经济补偿费用，又称电费滞纳金。电费违约金是法定违约金，是维护供用电双方合法权益的一项措施。

按期足额回收电费是供电企业经营活动的重要内容之一，也是供电企业保证向用户连续供电的重要物质基础。用户按照国家批准的电价、合同约定的期限和方式交付电费，不按合同约定的期限交付电费的，应承担电费滞纳的违约责任。世界各国对电费滞纳的违约责任都有明确规定，其电费违约金（滞纳金）的计算方法通常是按逾期日数乘以延期交付电费额，再乘以滞纳金率。

中国在《中华人民共和国电力法》和《电力供应与使用条例》中，对电价、电费和电费回收都做出了明确规定。《电力供应与使用条例》第三十九条规定："逾期未交付电费的，供电企业可以从逾期之日起，每日按照电费总额的千分之一至千分之三加收违约金。"在《供电营业规则》第九十八条中规定了电费违约金的具体计算方法：① 居民用户每日按欠费总额的千分之一计算。② 其他用户：当年欠费部分，每日按欠费总额的千分之二计算；跨年度欠费部分，每日按欠费总额的千分之三计算。

电费违约金收取总额按日累加计收，总额不足1元者按1元收取。

dianfengshan

电风扇 (electric fan) 由电动机带动风叶旋转来加速空气流动或空气交换的一类通风器具（见家用电器）。加速空气流动的目的是使人体皮肤或物体表面的水分快速蒸发，带走一些热量，使人体皮肤或物体表面温度降低或干燥。实现此类目的的电风扇包括吊扇、落地扇、台扇等。交换空气的目的是将空气从一个空间强制性地推送到另一个空间，实现空气在不同空间的流动，换气扇就是实现此类目的的产品。

1889年美国人J.J.伍德（J.J.Wood）制成世界第一台电风扇。20世纪电风扇品种增多，发展迅速，由简易无级调速发展到遥控、声控以及微电脑控制，实现阵风、山风、湖风、睡眠风，并具有启停电子定时控制等功能。带有温度传感器的电脑电风扇，可根据室温的变化，自动完成多档次风速的送风。20世纪末期电风扇向着智能化、提高送风舒适性的方向发展。

分类 按气流的进入和射出的方向分为离心式、轴流式和横流式。①离心式风扇，其空气由平行于转动轴的方向进入，垂直于轴的方向发射出去，如冷热风扇等。因叶片高速旋转时会产生噪声，故此类风扇仅适用于小风量情况。②轴流式风扇又称螺旋桨式风扇，其空气平行于旋转轴方向进入，并在平行于轴的方向射出空气流，如台扇、落地扇、吊扇、换气扇等。该类风扇风量较大，是生产量较大的电扇。③横流式风扇，其空气由垂直于轴的方向进入，从垂直于轴的另一方向射出，如风幕机等。


图1 落地扇

按产品形式分为台扇、台地扇、落地扇（见图1）、壁扇、顶扇、吊扇、转页扇、换气扇等。

基本结构 台扇、壁扇、台地扇、落地扇的结构基本相同，主要由电动机（扇头）、网罩（前罩和后罩）、风叶、摇头机构、机座（底座、立柱和连接头）、调速机构（调速器、调速开关）六大部分组成（见图2）。电风扇电动机有单相交流电动机、直流电动机和交直流两用电动机。单相交流电动机有电容运转电动机和罩极式电动机；罩极式电动机仅用做小规格风扇电动机。在船上和车辆上采用直流和交直流两用串励整流子电动机。电风扇网罩分前、后两部分，要求有足够的机械强度，且造型美观。电风扇风叶采用螺旋桨形，多用金属或塑料制成。摇头机构又称摇摆机构，由减速机构、摇摆连杆和控制机构三部分组成。

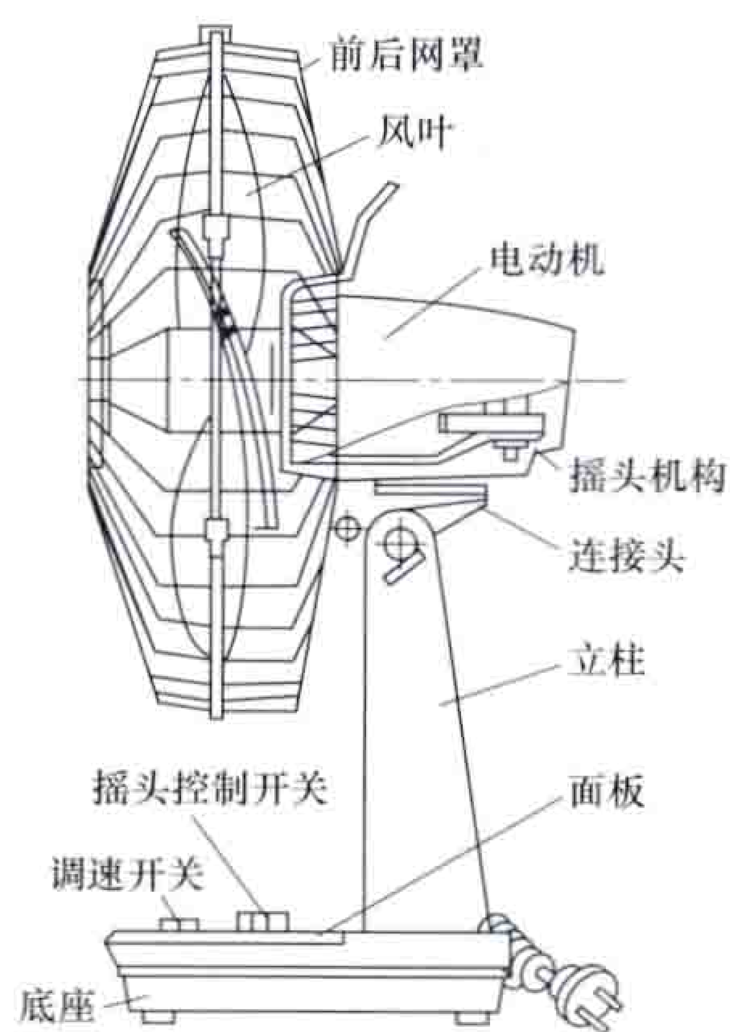


图2 台扇结构

吊扇主要由风叶、扇头、吊杆、吊攀、上下罩以及另外安装的调速器组成（见图3）。扇头由定子、转子、上盖、下盖组成。吊扇上轴承采用滚珠轴承，以支承扇头的轴向力；下轴承一般采用滚珠轴承或粉末冶金含油轴承。上、下罩一般用塑料制成。吊杆常用无缝钢管制成，电动机引线从管内引出。吊扇风叶的叶片多采用铝板冲

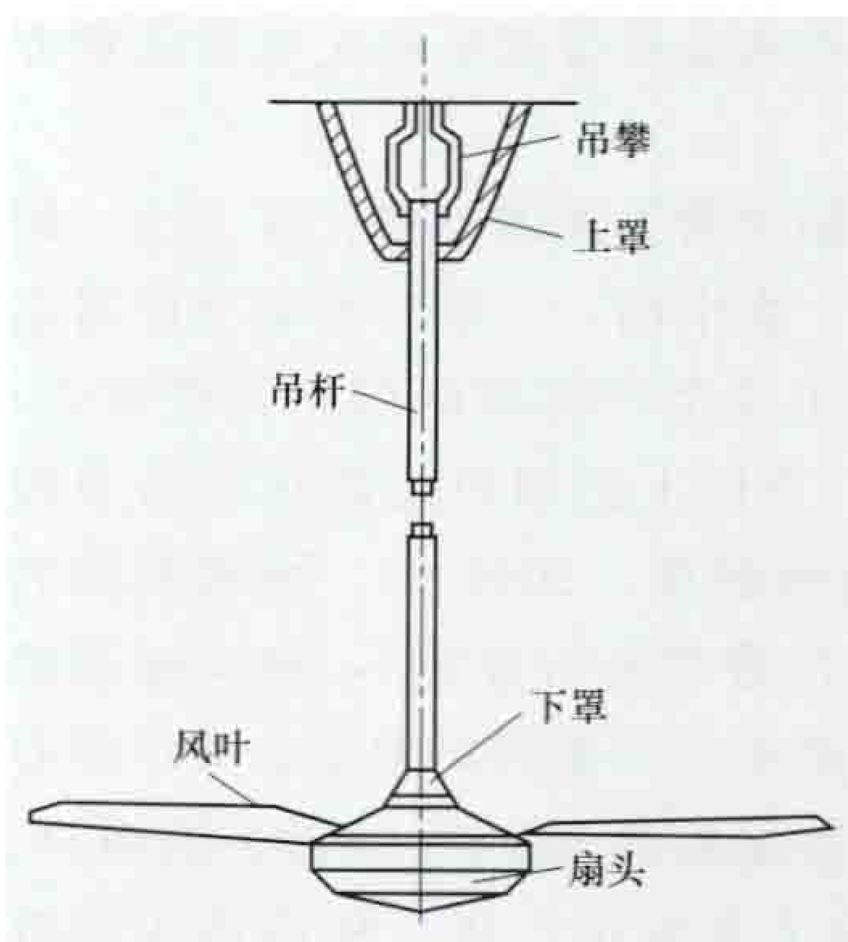


图3 吊扇结构

压成形，用螺钉固定在叶脚上。叶脚应有合理的倾角和足够的刚性，通常用冷轧钢板制成。

转页式电风扇属于轴流式电风扇，由电动机、扇叶、导风轮及壳体等组成。扇叶旋转输出的空气由导风轮改变方向，风压较小，犹如自然风。转页式电风扇有窗型（手提式、摺板式、立地式）、升降型、座钟型、雀笼型和多用型多种型式。

排风扇与转页式电风扇在结构形态上类似，通常安装在分割两个不同空间的隔墙或隔窗上。排风扇的转速要求较高，通常使用4极或2极电容运转电动机。

调速方法　电风扇的调速方法有电阻法、电抗法、电机抽头法和电子控制法。电阻法和电抗法是分别利用电阻器、电抗器作为降压调速元件，分别串接在直流电动机、交流电动机的电枢回路内，通过电阻器、电抗器的不同抽头与调速开关相连接，以达到调速的目的。电机抽头法是利用电动机的一次绕组或二次绕组的不同抽头与调速开关相连接，以增加定子一次绕组匝数来减少每匝电压伏数或减小一次绕组两端电压来减少每匝电压伏数，以削弱磁场强度，达到调速的目的。电机抽头法有T型、L型、H型数种。电子控制法是控制导通时间来改变电动机回路的端电压进行调速。

性能指标　电风扇的性能指标主要有风量、输入功率、使用值、调速比、噪声、功率因数等。风量是电风扇在每分钟所送出的空气量，单位为m^3/min；输入功率是电风扇在额定条件下运行时，由电源输入到电风扇的功率，单位为W；使用值是电风扇在额定条件下运行，电风扇送出的风量除以输入电功率所得的值，单位为$m^3/(min \cdot W)$；调速比是最低转速与最高转速之比，以%表示；噪声是电风扇在额定条件下运行时，在规定的距离内，噪声的声功率值；功率因数是平均功率对电风扇在额定条件下运行时电压和电流有效值乘积的比值，用λ或$\cos\varphi$表示。

选购　选购电风扇应注意规格和型式的选择、外观质量的检查并进行试运转。①规格和型式的选择。根据使用场所和需要风量来选择适当的规格和型式。②外观质量的检查。外形要美观大方，扇叶、金属罩不可有挤压变形。③试运转。电风扇通电试运转后，检查其调速开关、摇头开关、各类旋钮和琴键开关应操作灵活；电动机及扇叶运转应平稳，摇头及停摆过程平稳敏捷；电磁机械噪声以低为佳，电风扇从起动至正常运转的时间越短越好。

注意事项　电风扇的使用方法较简单，只需接通电源，按压琴键开关或转动旋钮即可运转。从安全角度考虑，应注意：①避免电风扇长时间运行造成电动机发热引起升温。一般电动机外壳表面温度不应高于70℃，即不能有烫手的感觉，以免烧坏电动机。②在潮湿多雨的地区，一定要使用三芯插头，当电动机绝缘性能降低发生漏电时，因为有可靠接地，从而防止触电事故的发生。

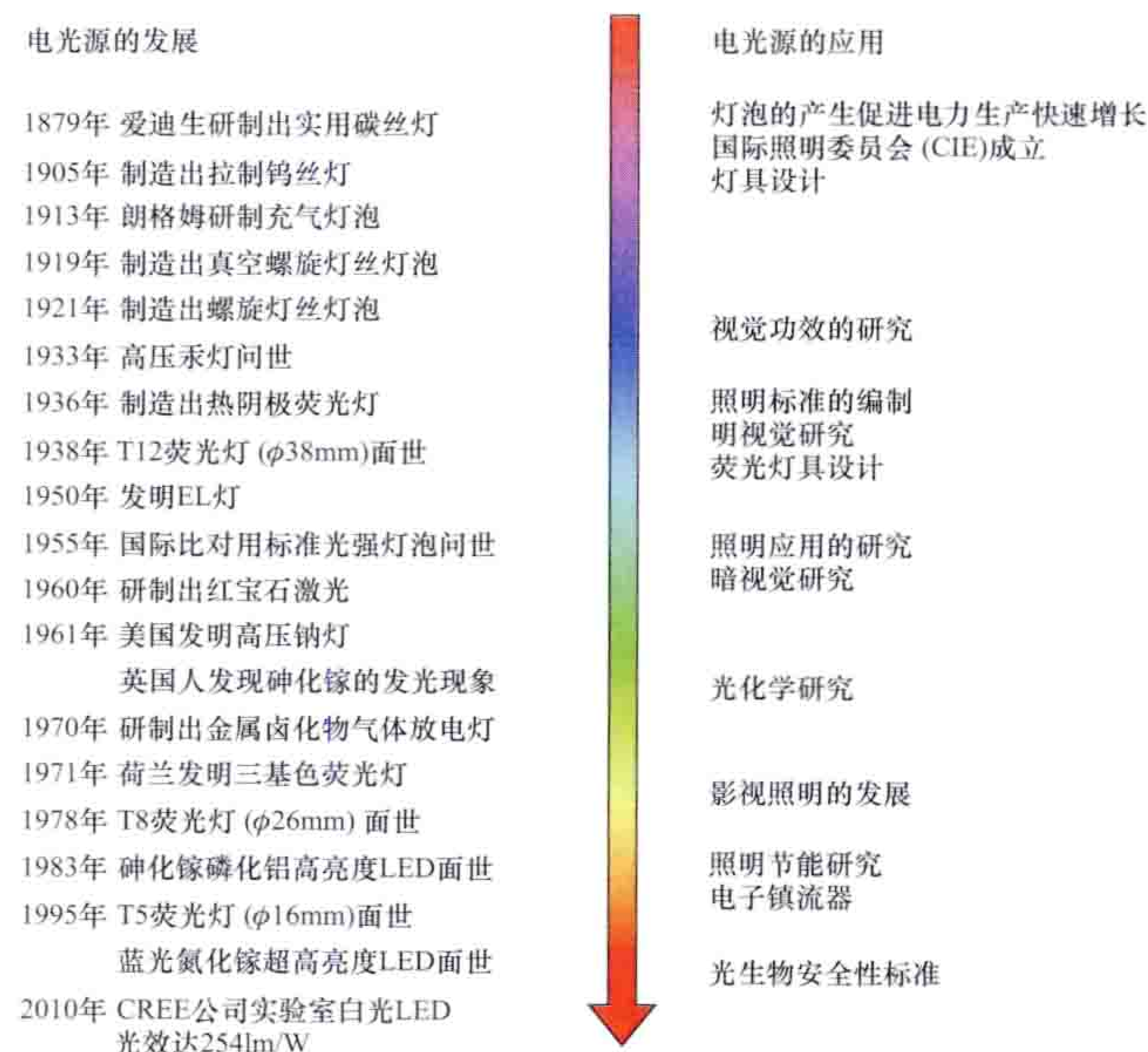
dianguangyuan

电光源　(electric light source)　将电能转换为光的器件。由电能转换为光能的过程不仅与电学及光学有着直接关系，而且还涉及热物理学、光源材料学、光源化学、电子学、制灯工艺学等多种学科。从电光源的发光原理、特性、发光过程中诸因素对发光的影响到提高发光效能的方法等均属于电光源应研究的范围。它的研究对象既有热辐射发光的白炽灯、卤钨灯，也有气体放电发光的霓虹灯、荧光灯、汞灯、钠灯、金属卤化物灯、氙灯和微波硫灯，还有固体发光的LED（发光二极管灯）和EL（电致发光器件）。

简史　1802年英国科学家H. 戴维（Humphry Davy，1778—1829）开始在实验室研究了白炽发光现象，1807年，制成第一台弧光灯。1844年，法国人J. B. L. 傅科制成用木炭作电极的弧光灯。1860年，英国人J. W. 斯旺（J. W. Swan）在抽出空气的玻璃泡内装上炭化纸丝，发明了原始的电灯。1877年美国发明家T. A. 爱迪生（Thomas Alva Edison，1847—1931）开始着手研究灯泡，到1879年发明了实用碳丝灯，结束了人类利用火光照明的岁月，步入了使用电光源照明的新时代。

1923年，上海生产出中国第一批白炽灯泡。1950年，生产出新中国的第一批荧光灯。

如图所示，电光源的发展和应用可分为四个时代：从1879年到20世纪30年代为白炽灯的发明、改进和成熟时代；30年代开始为以荧光灯为代表的低压气体放电灯的时代；60年代开始高压气体放电光源不断的技术改进使大功率高效光源得以推广应用；进入21世纪后，固体发光的LED和OLED（有机发光二极管）处于高速发展过程中，并已显现出在不远的将来逐步取代大部分低效率传统光源的态势。



电光源的发展与应用

分类　电光源的种类甚多，形状千差万别，分类方法不一，按其由电能转化为光能的形式分类，一般可分为热辐射光源、气体放电光源和固体发光光源。热辐射光源和气体放电光源两类为照明电光源，固体发光光源由于可控性优异，既可以用于照明，也可以用于信号标志或图形显示技术。

热辐射光源是利用电流使灯丝加热到白炽程度而发光的电光源，如白炽灯、卤钨灯等。物体加热到一定程度都会发出可见光，包括太阳、黑体辐射等。热辐射光源的特点是可以产生连续的光谱。

气体放电光源是利用电流通过气体（或蒸气）而发射光的电光源。这类光源按放电媒质分，有汞灯、钠灯、氙灯、

高压钠灯、金属卤化物灯等。气体放电光源按放电形式分，有辉光放电灯和弧光放电灯。辉光放电灯由正辉光放电而发光，放电的特点是阴极的次级发射比热电子发射大得多（冷阴极）、阴极压降较大（100V左右）、电流密度较小，因此，这种灯也称冷阴极灯。霓虹灯、冷阴极荧光灯属于这类光源。弧光放电灯是利用正弧光放电而发光，放电的特点是阴极压降较小，需专门的启动和镇流器件配合使用才能工作。荧光灯、汞灯、钠灯、金属卤化物灯等均属于这类光源。人们也常常按充入气体压力的高低将气体放电灯分为低压、高压和超高压3种。

固体发光光源是某种适当物质与电场相互作用而发光的电光源，场致发光灯和LED、OLED等属于这类光源。

技术参数和特性　电光源的技术参数和特性是评价电光源质量和合理选用电光源的依据。评价电光源特性的主要技术参数一般是指灯的发光效率、寿命、颜色、显色性、平均亮度、电特性、几何形状和尺寸等。常用电光源的主要技术参数见表。

常用电光源的主要技术参数

光源种类	额定功率范围（W）	发光效率（lm/W）	显色指数 R_a	色温（K）	平均寿命（h）
普通照明白炽灯	10～1500	7.3～25	95～99	2400～2900	1000～2000
卤钨灯	60～5000	14～30	95～99	2800～3300	1500～2000
直管形荧光灯	4～200	60～70	60～72	2700～6600	6000～8000
三基色荧光灯	28～32	93～104	80～98	2700～6600	12 000～15 000
紧凑型荧光灯	5～55	44～87	80～85	2700～6600	5000～8000
荧光高压汞灯	50～1000	32～55	35～40	3300～4300	5000～10 000
金属卤化物灯	35～3500	52～130	65～90	3000/4500/5600	5000～10 000
高压钠灯	35～1000	64～140	23/60/85	1950/2200/2500	12 000～24 000
高频无极荧光灯	55～85	55～70	85	3000～6500	40 000～80 000

发光效率指电光源发出的光通量和它所消耗的电功率之比，简称光效，单位为lm/W。它是评价电光源的首要技术参数。电光源的光效高就是指用少量的电获得更多的光。

电光源的寿命通常使用有效寿命和平均寿命两种指标。有效寿命指从光源自开始使用至光源光通量衰减到初始额定光通量的某一百分比（一般为70%～80%）所经历的点灯时数。平均寿命指一组试验光源从点燃到其中50%的光源失效所经历的点灯时数。

灯的颜色一般用色表评价。色表指灯光颜色给人的直观感觉，它的数量指标是色温或相关色温。

显色性指被照物体在灯光下色还原的优劣程度，对于大多数电光源而言，用显色指数 R_a 来表示，但对于LED等固体电光源的显色性如何恰当评价有较大争议。

平均亮度指光源发光体的各部位亮度的平均值，单位为cd/m²。

光源的电特性一般包括启动和再启动特性，电源电压波动对光源其他技术参数的影响。表示电特性的技术参数主要有光源的启动电压和工作电流。

光源的体积大小，结构是否紧凑，直接影响到灯具的控光特性和应用。

光源的电器附件　与气体放电光源配用的镇流器和触发器等电器附件，用于启动灯使之放电发光和限定灯的电流。

气体放电灯接通电源后，电流流过镇流器，在气体放电灯两端会产生持续时间短暂的脉冲高电压，强行激发灯内电极形成电子繁流放电；放电形成后灯端电压立即下降，此时镇流器一方面对灯电流进行限制，另一方面使电源电压和灯的工作电流之间产生55°～65°的相位差，从而维持灯的二次启动电压，使灯能更稳定地工作。常用的有普通电感镇流器、节能电感镇流器和电子镇流器。

电感镇流器结构简单、寿命长、价格低，市场占有率比较大。但它的功率因数低、低电压启动性能差、质量大、频闪效应明显，特别是自身耗电量大。普通电感镇流器能量损耗占整灯损耗的20%～25%；节能电感镇流器通过优化铁芯材料和改进工艺等措施降低自身功耗，能量损耗占整灯损耗的10%～15%。

电子镇流器是一个将工频交流电源转换成高频交流电源的变换器，输出20～100kHz的高频交流电流，加到与灯连接的LC串联谐振电路加热灯丝，同时在电容器上产生谐振高压，加在灯管两端，此时高频电感起限制电流增大的作用，保证灯管获得正常工作所需的灯电压和灯电流。为了提高可靠性，常增设各种保护电路，如异常保护、浪涌电压和电流保护、温度保护等。电子镇流器的能量损耗占整灯损耗的3%～5%，启动速度快、无频闪、功率因数高、可以大范围调光，是符合国家节能环保产业政策的产品。新一代电子镇流器还可附加数字调光、可寻址等功能模块，与智能化照明控制系统相结合后，丰富了低压气体放电灯的控制功能。

参考书目

周太明．光源原理与设计．2版．上海：复旦大学出版社，2006.

dianhuhan

电弧焊

（arc welding）　利用电弧作为热源的熔化焊方法，简称弧焊。焊接时，电弧在焊件的接缝处和电极之间燃烧，焊件接缝处的金属和必要时添加的填充金属受热熔化，形成熔池；电极用手工或机械方法沿焊接方向移动，或电极固定，焊件移动；熔池冷凝后形成焊缝，把焊件连接在一起。

电极分不熔化电极和熔化电极两种。不熔化电极通常用钨极，用以施焊时，可根据需要另加填充金属。熔化电极在焊接时不仅传导电流，而且其端部不断熔化作为填充金属填在接缝中。熔化电极通常做成焊条和焊丝两种形式。前者多用于手工焊接，后者则多用于自动或半自动焊接。各种金属的焊接各有其适用的焊条或焊丝。电弧焊的主要种类和用途见表。

电弧焊的主要种类和用途

名　称			用　途 （适宜于焊接的材料和焊接厚度值）	适用的焊接位置
焊条电弧焊			碳钢、合金钢、镍及镍合金、铜及铜合金等（3～20mm），铸铁（76mm）	各种位置
埋弧焊			碳钢、合金钢、镍及镍合金、铜及铜合金等（3～20mm），铸铁（76mm）	平焊位置
气体保护电弧焊	钨极惰性气体保护焊		碳钢、低合金钢、不锈钢、镍及镍合金、镁及镁合金（1.5～10mm），铝及铝合金、铜及铜合金、钛及钛合金（1.5～20mm）、难熔金属及其合金（1.5～3mm）	各种位置
	熔化极气体保护焊	熔化极惰性气体保护焊	碳钢、低合金钢、不锈钢、镍及镍合金、铝及铝合金、铜及铜合金、钛及钛合金、镁及镁合金（2～20mm）、难熔金属及其合金（2～6mm）	各种位置
		二氧化碳气体保护焊	碳钢和能耐受氧化性气氛和含碳气氛的合金钢（2～20mm）	各种位置
		药芯焊丝气体保护焊	碳钢、低合金钢、不锈钢等（3～20mm），铸铁（>6mm）	以平焊位为主
		氧化性混合气体保护焊	碳钢、合金钢、不锈钢	各种位置
		气电立焊	碳钢、不锈钢、铝及铝合金（15～75mm）	立焊位
	等离子体弧焊		不锈钢、镍及镍合金、钛及钛合金（0.02～20mm）、铝及铝合金（0.02～3mm）、难熔金属及其合金（0.02～6mm）	各种位置

电弧焊有电弧温度高、热量集中且容易控制等特点。各种金属材料，包括碳钢、低合金钢、耐热钢、高强度钢、铸铁等钢铁材料，镁、铝、铜、镍、钛等有色金属及其合金，钨、钼、钽、铌等难熔金属及其合金等都可选用适当种类的电弧焊进行焊接。

dianhu jiare

电弧加热　（electric arc heating）　利用电弧放电产生的热能对物料进行的电加热。电弧放电是气体受到电离而产生的放电现象，在由低压到高压的不同压力气氛中都能发生。电弧放电时，电流大而电压降小，产生强烈的弧光和热。

电弧加热的特点：①热量集中，温度高达3000～7500℃；②用不太复杂的设备能集中提供几万千瓦甚至几十万千瓦的巨大加热功率；③功率控制较方便；④能用于空气、真空或其他气氛中。

电弧加热是应用最广的电加热方法之一，主要用于冶金、化工、机械和环境保护等领域。在冶金和化学工业中主要用于炼钢（见电弧炉、钢包精炼炉），炼铁合金、冰铜、黄磷、电石等（见埋弧炉），熔炼钨、钼、钽、铌、钛、锆等难熔金属和活泼金属（见真空电弧炉）等。在机械工业中用于焊接（见电弧焊），以及碳弧气刨和电弧切割等。碳弧气刨和电弧切割与手弧焊类似，但要用碳棒作电极，工作时对熔化区吹压缩空气，以除去熔化的金属，实现对金属的刨削或切割。在环境保护领域主要用于垃圾焚烧熔融固化处理。

电弧　通常认为电弧由阴极电压降区、弧柱、阳极电压降区三个区域组成，而其中弧柱部分几乎占据了电弧的整个长度，弧柱中正负带电粒子所带的电荷数相等，所以在宏观上呈中性（见等离子体加热）。电弧有很高的能量密度，在有限的空间内可发出数以百万瓦计的功率，有高达数千摄氏度以上的温度。

供电加热用的电弧的特征：①阴极端头要有极高温度（通常由正离子撞击所致）和（或）在其附近有足够高的电场强度，以便从阴极发射电子；②气体电离的主要原因是从阴极发射并受到电场加速的电子与气体分子或原子碰撞的结果，其次是由于电弧本身有极高的温度；③由于电弧中有强大的电子流，因此两电极间的空间具有很高的电导率，在电压不很高的情况下，每平方厘米断面有数百安到数千安电流通过。

输入给电弧的功率用来使气体电离和使正离子和电子加速。供电加热用的电弧热来源于正离子和电子复合成分子或原子时释放出的能量，以及由正离子和电子撞击电极所产生的热量。在电路中电弧可以看做是一个电阻，其值等于电弧电压与电弧电流的商，但不是常数。

分类　按加热方式，电弧加热分间接电弧加热、直接电弧加热和埋弧加热三类；按电源性质，电弧加热分交流电弧加热和直流电弧加热两种。

间接电弧加热时，电弧发生在两根相同的电极棒之间，物料受到电弧热的辐射加热。这种加热方法热效率低，现已很少采用。

直接电弧加热时，电弧发生在电极和被加热物料之间，电弧电流流经物料，大部分电弧热可被物料吸收，热效率高。

埋弧加热时，电极端头埋在颗粒或粉末状物料内，物料除受到电弧的直接加热外，还受到电弧电流流经物料所产生的电阻热，包括物料粒子间的接触电阻热的加热。这种加热方法的热效率最高，但只适用于特定的物料。

交流电弧加热由电网通过变压器供电，有设备简单、价格低、使用方便等优点和电弧稳定性差、用电功率因数低、线路损耗大、噪声大以及对电力系统干扰严重等缺点。

直流电弧加热需要通过整流器供电，设备价格高。20世纪90年代以来，电力电子元器件发展迅速，促进了直流电弧加热的推广应用。20世纪末，直流电弧加热在冶金领域的应用取得进展，但由于交流电弧炉的迅猛发展，使直流电弧炉没有得到进一步的推广。

dianhulu

电弧炉　（arc furnace）　利用电弧加热的电炉。电弧加热具有温度高、热量集中，而且可在不同气氛和不同气压下进行加热的特点，适用于物料的熔化和冶炼。

按电弧炉加热方式的不同，电弧炉（见图1）分为直接电弧炉、间接电弧炉和埋弧炉。

直接电弧炉的电弧发生在专用的电极棒和被熔化的（或已熔化的）炉料之间，炉料受到电弧的直接加热，如图 2（a）和图 2（d）所示。这类电弧炉主要有三相交流炼钢电弧炉、真空自耗电弧炉、直流电弧炉、钢包精炼炉以及熔铸耐火材料电炉等。


图 1　电弧炉

间接电弧炉的电弧发生在两根专用的电极棒（一般是石墨电极）之间，而炉料只受到电弧辐射的间接加热，如图 2（b）所示。这类电弧炉曾用于铜及铜合金的熔化，因运行时噪声大、工作条件差，已被感应炉替代。

埋弧炉的电弧发生在埋入到炉料内的电极前端与被熔化的（或已熔化的）炉料之间，如图 2（c）所示。在电弧加热的同时有一部分热量是因为电流通过炉料，由炉料的电阻而产生的，所以又叫电弧电阻炉。这类电弧炉在其熔化区可以获得强还原性气氛，主要用于还原矿石，生产铁合金、冰铜、化工产品等，又称矿热炉。

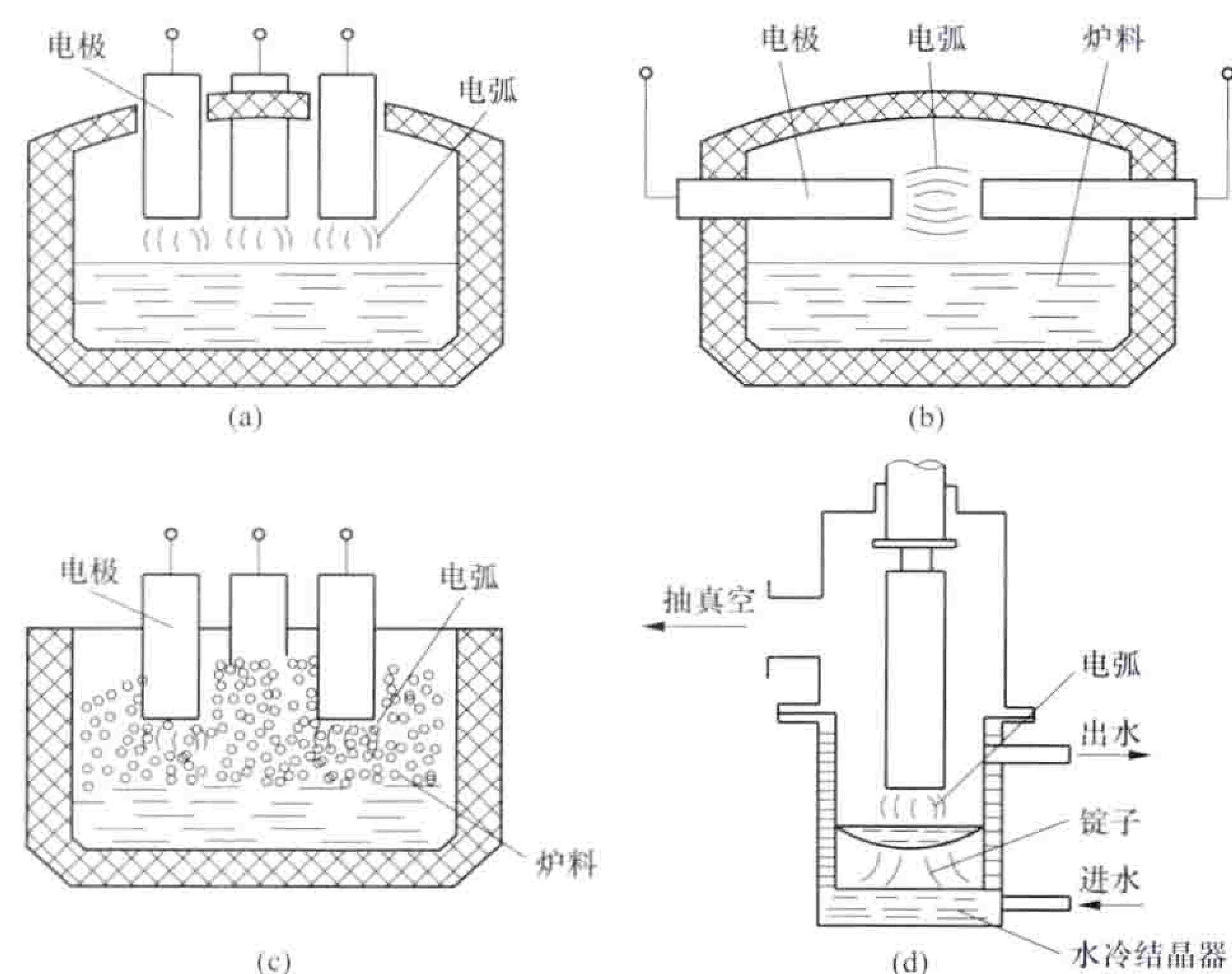


图 2　电弧炉加热方式
（a）直接电弧炉；（b）间接电弧炉；（c）埋弧炉；
（d）真空自耗电弧炉（直接电弧炉的一种）

dianhulu dianji

电弧炉电极　（electrode of arc furnace）　一种通常用石墨制成的导电零件。在电弧炉中其一端接电源，另一端与炉料或另一电极间产生电弧。

电弧炉电极按原料分两大类：一类是用碳素原料制成的碳素电极、石墨电极和自焙电极；另一类是用金属材料制成的自耗电极、钨电极和水冷铜电极。在工业上普遍应用的有 3 种电极：石墨电极主要用于炼钢电弧炉，自焙电极用于埋弧炉，自耗电极用于真空电弧炉和电渣重熔炉。

碳素电极和石墨电极　碳素电极是以无烟煤和焦炭为原料，以沥青为黏结剂，混合后挤压或模压成形，在焙烧炉内，经 1000～1250℃ 温度焙烧成坯，然后加工到规定尺寸而成。为了提高产品性能，也有把经过约 1000℃ 温度焙烧后的坯件用沥青浸渍，在约 700℃ 温度下二次焙烧，焙烧后再进行加工，制成碳素电极。

碳素电极的形状大多数为圆柱形，最大直径可达 1200mm；也有做成长条形，用以拼接成正方形或长方形的电极束（这样的电极曾用于制造电石或电熔刚玉的埋弧炉中）。碳素电极在电弧炉中已较少使用，但采用同样工艺制成的其他碳素制品，如用于炼铝的碳素阳极，用于高炉和埋弧炉的碳砖等仍用得很普遍。

石墨电极的原料以碳系针状焦和石油焦为主，前期制造工序与碳素电极一样，但经过约 1000℃ 温度焙烧后的坯件要在石墨化电炉（见直接电阻加热装置）中再次加热到约 2000～3000℃，使电极中碳原子重新排列形成石墨结构的晶体，制成的电极坯再经过机械加工而成。与碳素电极比，石墨电极电导率高、抗氧化性好、线胀系数小、热震稳定性好、质地软、易加工，广泛用于炼钢电弧炉中。

石墨电极呈圆柱形，其直径系列在国际上已标准化，即 75，100，130，150，175，200，225，250，300，350，400，450，500，550，600，700，750，800mm，长度在 1000～2400mm 范围内，直径愈大，长度愈长。电极两端都有圆柱形或锥形内螺纹孔，可用有外螺纹的石墨接头把两根同直径的电极连接在一起，以便于连续使用。

传统上，石墨电极分为普通功率（RP）、高功率（HP）和超高功率（UHP）3 种类型。超高功率石墨电极的体积密度、机械强度和允许电流密度均较前两者大，电阻率较前两者小。20 世纪 90 年代以来，随着炉容量的大型化和超高功率供电技术的发展，炼钢电弧炉用石墨电极基本上已全部超高功率化。除特殊情况外，普通功率石墨电极已不再使用。

碳素电极和石墨电极在室温下的主要性能（参考值）见表。

碳素电极和石墨电极在室温下的主要性能

性　能	碳素电极	石墨电极	
		普通功率	超高功率
体积密度（g/cm^3）	～1.55	1.56～1.59	1.66～1.70
电阻率（$\mu\Omega \cdot m$）	21～50	6.5～8.5	4.0～6.0
线胀系数（10^{-6}/℃）	3～38	1.5～2.2	1.0～1.6
热导率［W/(m·K)］	7～30	120～190	160～200
抗压强度（MPa）	20～22	>18	>23
抗弯强度（MPa）	～6	8.0～9.5	12.0～17.0
抗拉强度（MPa）	～2.5	4.5～6.0	6.0～7.0
弹性模量（GPa）	5～15	7.1～9.2	9.0～12
含灰量（%）	0.8～5	<0.5	<0.2

自焙电极　利用电弧炉自身的热能在炉子上焙烧而成。自焙电极呈圆柱形，外侧是一层 1～2mm 厚的钢板外壳——电极筒。制造电极用的碳素原料与制造碳素电极用的类似，但加有较多的黏结剂，使电极料在热态下成糊状，称电极糊。焙制程序大致是：①用钢板焊成电极筒，把电极筒下端用钢板焊封；②用炉子上方的电极夹持设备把电极筒固定在适当的位置上；③加炉料（呈颗粒状）入炉，使电极筒端头埋在炉料内；④向电极筒内加电极糊；⑤通过导电夹

头，对电极和炉料送低压电，使电极下部料由于电极和炉料中产生的电阻热和电弧热（见电阻加热、电弧加热）逐渐焦化烧结而成固态；⑥加大电流使下端钢板熔化，电极下端直接与炉料接触，至此电炉可投入正常运行；⑦随着电极下端的消耗，利用电极上方的压放设备定期把电极向下移动一段距离；⑧在原来的电极筒上方再焊接一段新的电极筒，加入新的电极糊。这样周而复始连续焙制。在正常运行中，自焙电极大体上可分成四部分，由上而下依次是电极糊部分、塑性料部分、局部焦化部分和烧成部分。自焙电极因可连续焙制，且直径较大（最大约 2m），在埋弧炉中得到广泛应用。

自焙电极的电阻率约 16～70$\mu\Omega\cdot$m，允许电流密度约 5～6A/cm^2。

自耗电极　由被熔炼金属本身制成，在使用过程中电极下端不断熔化消耗，在炉内水冷结晶器中冷凝成铸锭。在这一过程中金属得到精炼。

供合金钢重熔用的自耗电极是用由炼钢电弧炉、感应炉等熔炼的钢液浇铸成的，必要时要经过焊接、锻造和机械加工。供钛、锆、钼、钽、铌等活泼金属和难熔金属重熔用的自耗电极是用焊接法或等静压法制成的。所用原料有粉末状料、海绵状颗粒料、板状或棒状废料等。粉末料或颗粒料可先用模压机压成块，然后在惰性气体保护下焊接成电极；板状或棒状废料可直接焊接。粉末料也可用等静压装置在约 50MPa 压力下压制（必要时再经焊接），制成电极。

钨电极和水冷铜电极　钨电极用于非自耗真空电弧炉，水冷铜电极在实验室中使用。

dianhulu dianji tiaojieqi

电弧炉电极调节器　(electrode automatic regulator of arc furnace)　用来自动控制电弧炉电极的升降，从而调节炉子输入功率的设备，又称电弧炉功率自动调节器。为了满足冶炼工艺或生产管理要求，在电弧炉的不同工艺阶段要设定相应的电流和电压参数，也就是设定了电弧炉的阻抗，即所谓“工作点”，由此确定电弧炉的输入功率。工作点可以按特定的冶炼工艺和生产管理要求人工手动设定或由程序自动设定。在电炉变压器输出电压已定的情况下，由于炉料的熔化、炉料与电极接触情况的改变、炉内冶金反应和电磁力等的影响，电弧阻抗会经常变化，电流和输入功率也随之改变。电弧炉电极调节器用来及时检测出这种变化，并自动调节电极的位置，使电弧阻抗保持在设定的工作点附近。它是电弧炉的重要组成部分，对保证电弧炉正常运行、提高生产率、降低电耗等起重要作用。

电弧炉电极调节器由信号检测、比较、综合、放大、反馈等环节和执行环节（电极升降机构）组成。三相交流电弧炉的每相电极各有其调节器，独立工作，相互耦合。

性能指标　包括稳定性、响应速度、灵敏度和电极升降最大速度。

稳定性好的调节器，其过渡过程应为非周期性的或衰减式的振荡，最多只有一次超调。

响应速度用响应时间表示，指从偏差信号出现到电极达到最大速度的 90% 的时间，一般要求不大于 100～300ms（随炉子容量而异）。

灵敏度以不灵敏区 2Δ 表示，即

$$2\Delta=\frac{I_s-I_j}{I_N}\times100\%$$

式中 I_s 为电极开始上升时的电弧电流，A；I_j 为电极开始下降时的电弧电流，A；I_N 为额定电弧电流，A。2Δ 要求不超过 15%。

电极升降最大速度应满足不同容量电弧炉的工作需要，一般对 70t 及以下的电弧炉，电极上升最大速度大于或等于 9m/min，下降最大速度大于或等于 6m/min。

传动方式　电极升降传动方式可分为电机式和液压式两类，相应的设备称为电机式调节器和液压式调节器。采用电机式传动时，一般用钢丝绳卷扬机、齿轮齿条升降或螺母螺杆升降等几种；采用液压式传动时则采用升降液压缸。欧洲广泛采用液压式传动，日本和美国电机式传动使用较普遍。中国 10t 以下的炉子用电机式传动较多，较大容量的炉子则用液压式传动较多。

电机式调节器　包括变频调速-交流电动机式调节器、晶闸管交流力矩电机式调节器、直流电动机式调节器、晶闸管-转差离合器式调节器等 4 种。以变频调速-交流电动机式调节器使用最为广泛，后 3 种调节器已很少采用。

变频调速-交流电动机式调节器的原理见图 1。来自电弧电流和电弧电压的信号经弧流变换器和弧压变换器进入三相检测切换装置，经信号检测比较环节，将比较后的差值信号经放大器及比例积分微分（PID）处理后送至变频器，控制变频器输出电压的极性和频率，从而决定电动机的转向和转速，带动电极升降。变频器采用矢量控制（VVVF）方式。该调节器调速范围大，在电极升降速度接近于零的低速状态下也可稳定地获得高的转矩，改善了调压调速系统低速性能差和电动机容易发热的缺点。

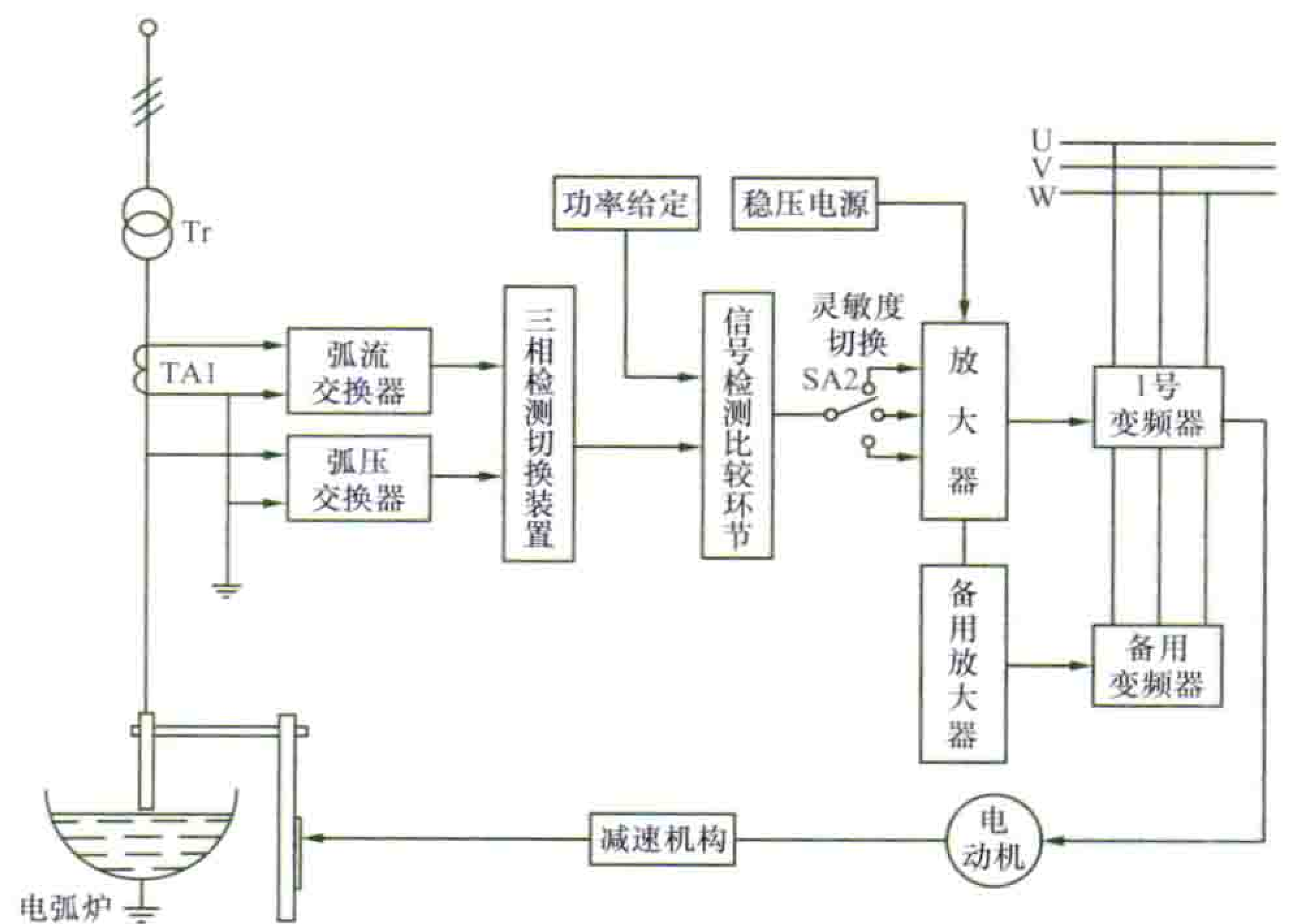


图 1　变频调速-交流电动机式调节器原理图

液压式调节器　该调节器的原理见图 2。来自电弧电流和电弧电压的信号在平衡臂比较后，其差值经放大器放大后控制液压阀电磁线圈电流的大小和极性，从而改变阀孔的开口大小和液流方向，通过液压缸直接带动电极臂升降。常用的液压阀有电液伺服阀和比例阀两种。液压介质大多用水-乙二醇。液压式调节器的优点是没有转动部分的惯性，起动性能好，电极响应时间仅有 40～80ms，电极升降速度快，最大上升速度可大于 20m/min。

特点　由于三相交流炼钢电弧炉、直流炼钢电弧炉（见

炼钢电弧炉)、埋弧炉、真空自耗电弧炉(见真空电弧炉)等各类电弧炉工艺不同,与之匹配的调节器也各有特点。

三相交流炼钢电弧炉用调节器　三相交流炼钢电弧炉在运行中,电弧阻抗变化剧烈,因此要求调节器反应灵敏,电极升降速度快。为了检测电弧阻抗的变化,分别用电压互感器和电流互感器检测电弧电压和电弧电流信号。这两个信号分别经整流和滤波产生两个直流电压信号进入比较环节。当电弧炉工作在设定的工作点时,电弧电流信号和电弧电压信号相等,比较环节输出为零,电极升降机构不动作。当工作点偏离设定值时,两个信号不相等,比较环节输出一个表示两信号差值的直流信号,该信号经放大后输出到执行环节。偏差信号的极性决定电极的升或降,而其大小则决定电极的升降速度。由于电源电压波动的影响,这种阻抗调节器中还引入功率设定值,并可按功率设定值与实际值的偏差自动调节阻抗设定值的输出电压。通常,液压式调节器控制系统由PLC系列可编程控制器及工业控制计算机组成。电极升降的各种信号送入PLC的输入模块,经PLC软件程序处理后,其输出信号直接输送给液压系统的比例阀放大板。开关量输出经中间继电器控制电液伺服阀或比例阀。工控机可以对电极升降中各种参数进行监控。

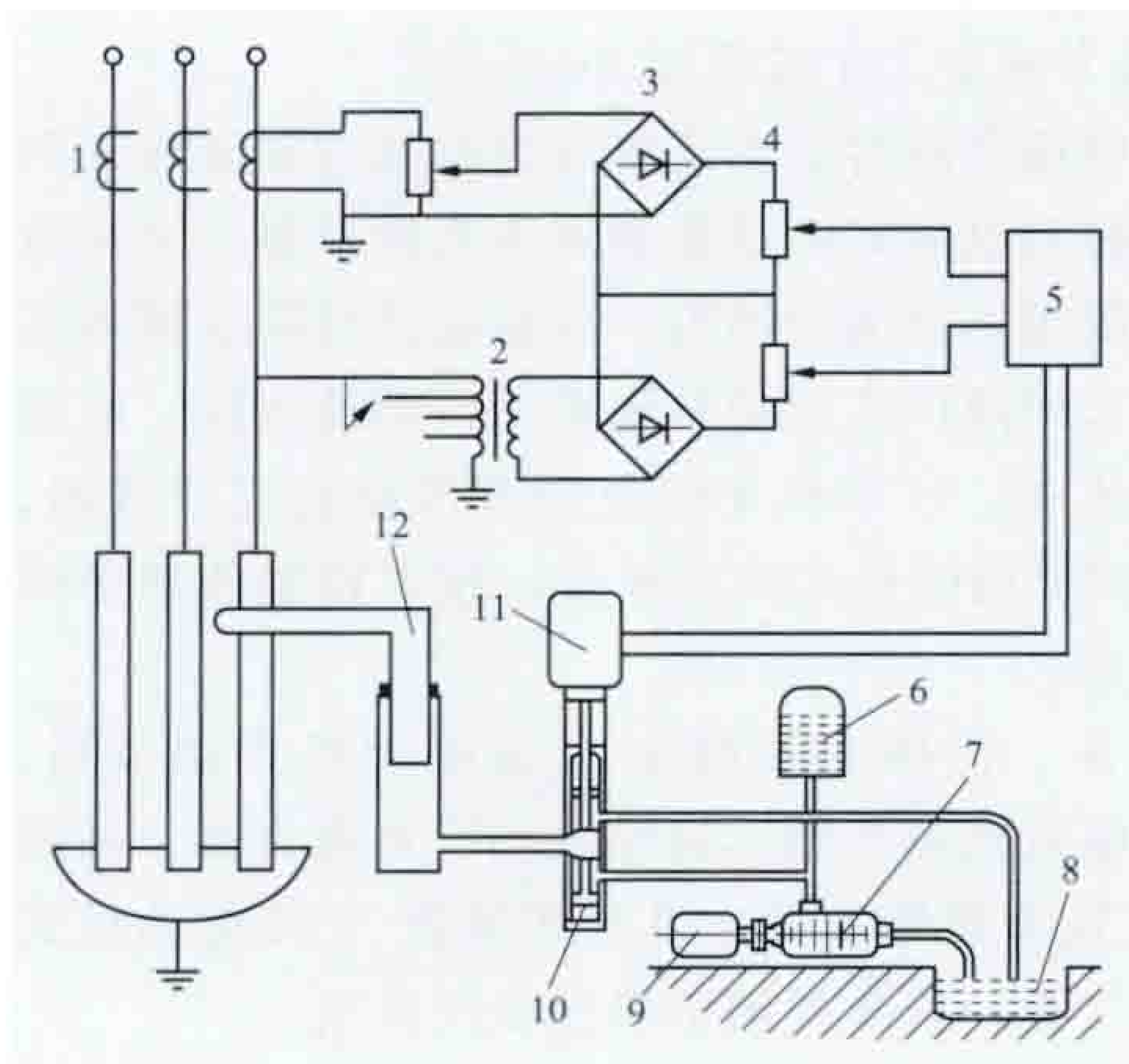


图2　液压式电极调节器原理图

1—电流互感器;2—电压变换器;3—整流器;4—平衡臂;5—放大器;6—蓄能器;7—液压泵;8—储液箱;9—电动机;10—液压阀;11—液压阀线圈;12—电极升降液压缸

直流炼钢电弧炉用调节器　这类调节器在许多方面与三相交流炼钢电弧炉用调节器相同,但电流信号由直流互感器或直流分流器检测,而电弧电压信号则取自正负电极间的电压,两信号经处理后再进入比较环节。

埋弧炉用调节器　埋弧炉运行过程中电流和功率的变化都不像炼钢电弧炉那样剧烈,调节器根据电极端的消耗和炉内反应移送电极,没有必要迅速改变电极的升降。相反,电极的大幅度上下运动有时会对炉况带来不利影响。早期的埋弧炉电极升降机构多数采用电动卷扬机式,现在大型埋弧炉则采用液压式。采用的控制方式与炼钢电弧炉的类似,但也有采用更为简单的、有触点或无触点继电器配以开关元件的控制方式。

真空自耗电弧炉用调节器　真空自耗电弧炉用直流供电,工作中炉况稳定。当这种电弧炉的电极与水冷铜坩埚之间产生边弧时,有可能击穿坩埚,冷却水进入熔池,可能会引起爆炸事故。熔炼时电弧长度短,自耗电极(见电弧炉电极)的上下调节距离小,普遍用脉冲式调节器,它根据金属熔滴通过电弧等离子区时所引起的电压波动脉冲次数和短路脉冲的幅度来控制电极的升降。

dianhu luozhuhan

电弧螺柱焊

(arc stud welding)　利用电弧作为热源将金属螺柱或其他紧固件焊接在工件上的焊接方法。广泛应用于压力容器、机器零部件、电力电子机械、建筑和桥梁等工业领域。

电弧螺柱焊的特点:①操作简单,使用简便;②易于实现自动化,焊接效率高。

电弧螺柱焊的基本原理是将螺柱一端与板件(或管件)表面接触并通电引弧,待接触面熔化后,将螺柱送入工件上的焊接熔池形成焊接接头。通常有普通电弧螺柱焊、电容储能螺柱焊、短周期螺柱焊、步进式电弧螺柱焊等。

普通电弧螺柱焊　该方法通常用陶瓷环或气体保护焊接区,以获得优质焊接接头。常用于焊接直径为3~25mm的螺柱。电弧螺柱焊的电源一般是具有下降电源外特性的焊接逆变器或直流弧焊发电机,其最大瞬时输出功率远比焊条电弧焊和埋弧焊等电源大得多。

电容储能螺柱焊　它是以电容器组作为电弧的供电电源,被充电的电容器组在螺柱与工件之间以电弧形式释放电容器组中存储的全部能量,从而产生瞬间不稳定的电弧。电弧电压和电流在瞬时变化着,因而其焊接过程是不可控的。电容储能螺柱焊的特点是在焊接过程中电流峰值可以达到数千安或者数十千安,但是焊接过程却很短,大约在0.8~3.0ms之间,熔池深度也只有0.05~0.2mm。

短周期螺柱焊　该方法的核心是采用双电流控制技术对电弧螺柱焊过程进行精确控制,焊接时间一般在10~120ms之内。焊接开始时,利用一小电流(30~60A)引弧,持续几十毫秒后,触发大的焊接电流(200~3000A)在母材上形成熔池,完成焊接。引弧电流在焊接过程中能够起到清扫工作表面涂层以及引发焊接电弧的作用,因此短周期电弧螺柱焊在有镀层的薄钢板上焊接螺柱方面具有优势。

步进式电弧螺柱焊　采用步进电机-丝杠传动为主要机构的步进式电弧螺柱焊枪及其控制器,实现对螺柱的送进量进行精确控制。该方法解决了以往螺柱送进不可控的问题,以螺柱与工件之间的挤压力为检测值,采用位移传感器检测螺柱送进过程中焊枪弹簧压缩的位移量,以此来获取螺柱与工件之间的接触状态,实现对螺柱送进深度的精确控制。可应用于建筑结构的穿透焊接中,解决了由于压型板与钢梁之间的不确定间隙、钢梁的表面状态等引起的焊接质量问题。

dianhua dangliang

电化当量

(electrochemical equivalent)　在电极上通过单位电量时,电极反应生成产物之理论质量。电化当量的值因所选用的单位不同而有所不同,常见单位为g/C、mg/C和g/(A·h)。例如,银的电化当量为0.001 118 00g/C,1.118 00mg/C,4.025g/(A·h)。由电解液中析出1g的任何物质,或1g的任何物质转入电解液需要相同的电量96 490C,即1F(F为法拉第常数,见法拉第电解定律)。按照这一关系,可以计算出通过一定电量时,在阴极上析出的物质的量。

dianhuaxue

电化学

(electrochemistry)　研究化学能与电能之间相互转换规律以及与此相关的现象与过程的科学。有自发

倾向的化学反应可以将化学能转换为电能，电解时电流通过物质引起化学变化可以将电能转换为化学能，这两类统称为电化学体系。电化学体系是由电子导体（通常为金属）和离子导体（通常为酸、碱、盐的水溶液或其他电解质）构成的，其电化学式可写成：电子导体｜离子导体｜电子导体，或电极｜电解质｜电极。式中“｜”代表界面。一个电化学体系至少含有一个离子导体（电解质）及与其相接触的两个电子导体（电极），化学能和电能的相互转换就发生在电子导体和离子导体相接触的界面上。在外电路接通后，电化学体系中电解质的正、负离子分别移向不同极性的电极。在一个电极上得到电子发生还原反应，在另一电极上失去电子发生氧化反应，总反应为氧化-还原反应。这些反应都需要释放或消耗直流电能。电化学是一门交叉学科，它研究的是学科间的领域，如化学、材料科学、力能学、生物学、工程学等学科中所出现的荷电界面的行为。电化学和其他学科的相互渗透，逐步形成量子电化学、固体电化学、光电化学、化学电化学、环境保护电化学、生物电化学等新的边缘学科。

发展简史 18世纪80年代，意大利物理学家A. L. 伽伐尼（Aloisioo Luigi Galvani，1737—1798）发现自然界中存在有电流。1800年，意大利人A. 伏打（Alessandro Volta，1745—1827，见图1）制成了第一个银锌原电池并研究了在电池内进行的电化学反应。电池的发明早于直流发电机的发明（1870年），它不仅开创了电化学的历史，也开创了电磁学的历史，同年，电解水成功。1807年，英国人H. 戴维（H. Davy，1778—1829）用电解法成功地从钾、钠的氢氧化物中分离出了金属钾与钠。1833年，英国科学家M. 法拉第（M. Faraday，1791—1867）制定了一套电化学新名词，提出“电极”“离子”“电解”“电解质”等概念，以及著名的关于电化当量的法拉第电解定律。1853年，德国人亥姆霍茨（Helmholtz）提出了双电层结构的第一个定量理论。1887年，瑞典人S. A. 阿累尼乌斯（Svante August Arrhenius）在溶液性质和理论研究的基础上创立了电离理论。1889年，德国人能斯特（Nernst）创立了原电池理论，使电化学热力学逐步完善。1905年，瑞士人塔菲尔（Tafel）提出描述电流密度和氢过电位之间的半对数经验公式。这些学说奠定了电化学的理论基础，也为其在工业上的应用开辟了广阔的道路。20世纪50年代，对经典的电化学理论有了根本性的突破。现代观点认为，电化学可以分成两大部分，即电解质学（又称离子学）及电极学。前者研究电解质的导电性质、离子的传输特性、参与反应的离子的平衡性质，后者研究电化学界面的平衡性质（电化学热力学）和非平衡性质（电化学动力学）。1963年，比利时人马塞尔·普尔贝（Marcel Pourbaix）出版了按元素周期表分类汇编的金属-水系的电位-pH图，这对冶金、化工等学科都有非常重要的意义。20世纪70年代末，中国学者傅崇说提出了用平衡原理绘制复杂体系的电位-pH图。自此之后，电化学科学有了迅速的发展，进入了用量子理论解释电化学过程的新时期。



图1 A. 伏打

电化学主要领域 包括日常生活和工业生产多个方面，如电池、电解、金属的腐蚀与防护、环境保护电化学、生物电化学等领域都存在着电化学。

电池 利用物质的化学变化或物理变化，并能把这些变化所释放出来的能量直接转变成电能的装置，是由负极、正极和电解质组成的电化学体系。其电化学式可写成

(一)负极活性物质｜电解质｜正极活性物质(＋)

电池放电时，在负极与电解质接触的界面上发生氧化反应，在正极与电解质接触的界面上发生还原反应，化学能转变为电能，形成直流电流。对于可充电的电池，如蓄电池，充电即注入电能时，其电极反应和放电时的电极反应正好相反，在负极有还原反应，在正极有氧化反应，将注入的电能以化学能的形式贮存于负、正极活性物质中。改变构成负极、正极、电解质三者的物质，可以构成不同种类的电池系列，从而形成各种不同的独立电源，以适应民用、电气照明、交通运输、电信、工业、航空、航天、海洋开发、军工等领域的需要。电化学电源工业已成为十分重要的工业体系。（见化学电源）

电解 电能转化为化学能的过程，是由阳极、阴极及电解质组成的将电能直接转化为化学能的体系，即阳极｜电解质｜阴极。以电解精炼为例，阳极为含有杂质的金属板，阴极通常为阳极金属的电解精炼金属板，电解质为阳极金属盐的水溶液。将直流电能注入此电解体系时，阳极金属失去电子，成为金属离子溶解于电解液中，此过程是氧化反应。在阴极，电解液中的阳极金属离子从阴极获得电子而还原成金属原子，沉积在阴极上，此过程是还原反应。这种氧化-还原反应就是电能转换为化学能的过程，表现为含杂质的阳极金属在阴极沉积为较纯的阴极金属。电解技术不仅应用在科学研究上，也广泛应用于化工、金属冶炼及精密加工等工业领域。

金属的腐蚀与防护 金属（贵金属除外）都有生成氧化物并从金属表面剥落的倾向。曝露于大气中的金属表面上常覆盖有一层不可见的湿液膜。金属表面某一部分的原子释放出一个或两个电子而变成离子进入湿液膜的水中，所放出的电子则从金属中移出，仍经金属转移到金属的另一部分，并与氢离子结合成氢原子，形成氢分子。在这一过程中，放出电子的那一部分为阳极，接受电子放出氢气的另一部分为阴极，湿液膜为电解质溶液，构成电化学体系，即电极｜电解质｜电极，并且是被金属本身所短路的电化学体系。这种被短路的电池放电过程，在金属表面的各部分反复进行，金属溶解成离子（腐蚀）并放出氢气，不能输出电流，故称腐蚀原电池。金属船体、各种地下金属管道、钢铁构件，都有电化学腐蚀问题。严重的腐蚀往往发生在金属结构的关键部位，所造成的损失常常远大于金属部件本身的价值（见电化学腐蚀）。在防腐措施中，多数也是电化学科学的应用，如电镀、阳极氧化、缓蚀剂和电化学保护等，由此，催生了金属的电化学保护、缓蚀剂的选用、耐蚀材料的开发、钝化膜理论的研究等（见电化学防护）。

环境保护电化学 在用水现场利用电渗析使污水得到净化、再生利用的过程，见图2。用阴、阳离子膜将容器分隔为三个室，在两侧的电极室中分别装有阴、阳极，并有阴、阳极电解液（通常为水）在其中流通，污水则通过中央室处理。这种电渗析的电化学体系的表达式可写成：阴极｜阴极电解液┆废水┆阳极电解液｜阳极，式中“┆”代表隔膜。阴离子能较容易地通过阴离子膜，而阳离子则不能通过。相

反，阳离子较易通过阳离子膜，而阴离子则不能。该装置通直流电后，在电场的作用下，污水中的阴离子通过阴离子膜进入阳极室，阳离子通过阳离子膜进入阴极室。将若干电渗析槽串联使用，可将污水净化到所需要的程度。

生物电化学　电在生物体内普遍存在。生物学认为，组成生物体的每个细胞都是一台微型发电机。细胞膜内外带有相反的电荷，膜外带正电荷，膜内带负电荷，膜内外的钾、钠离子的不均匀分布是产生细胞生物电的基础。

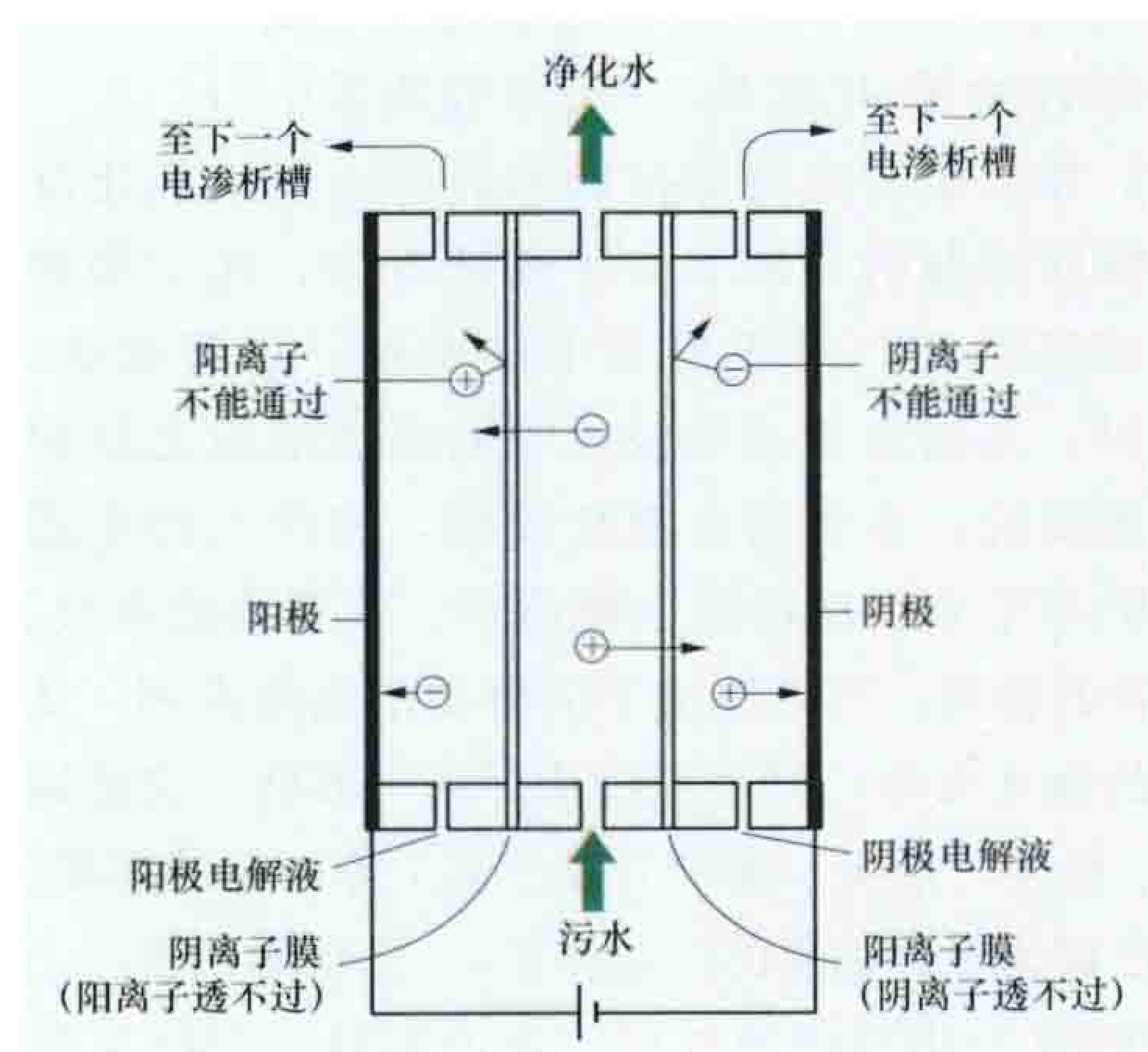


图2　电渗析法除去污水中的带电粒子原理

电化学方法在生命科学中应用广泛，主要有电脉冲基因直接导入、电场加速作物生长、癌症的电化学疗法、电化学控制药物释放、在体研究的电化学方法、生物分子的电化学行为、血栓和心血管疾病的电化学研究、骨骼的电生长、心电图和脑电图的研究、生物电池等。

电化学在工业上的应用　电解氯化钠产出氯与氢的工业是化学工业的基础工业之一。用电解方法提取、精炼金属是冶金工业的基本手段。电镀对增加物件外观光泽和防腐蚀都有重要作用，利用电镀方法所形成的与模型一样的复制件，可用于外形不规整而又有严格要求的铸造，即电铸。以金属零件作阳极，在一定条件下电解，可以得到光亮的表面，即电抛光。电解加工是利用阳极溶解改变制品表面形状和尺寸的一种加工方法，常用于加工异形硬质合金零件。在活泼金属如铝的表面，用阳极氧化的方法形成一层牢固的氧化膜，能保护金属不受腐蚀。金属的锈蚀是最普遍的电化学过程，阴、阳极保护是金属防锈的重要措施之一。应用电池原理发展起来的化学电源工业，产品种类繁多，应用范围极广。

电化学的发展及应用已经为人类社会的物质生活、生产、科学研究带来不可估量的影响，而且将成为未来能量供应，材料的稳定、再生与合成，医学及药物学等的重要环节。电化学的应用及发展见图3。



图3　电化学的应用及发展

参考书目

龚竹青，王志兴．现代电化学．长沙：中南大学出版社，2010.

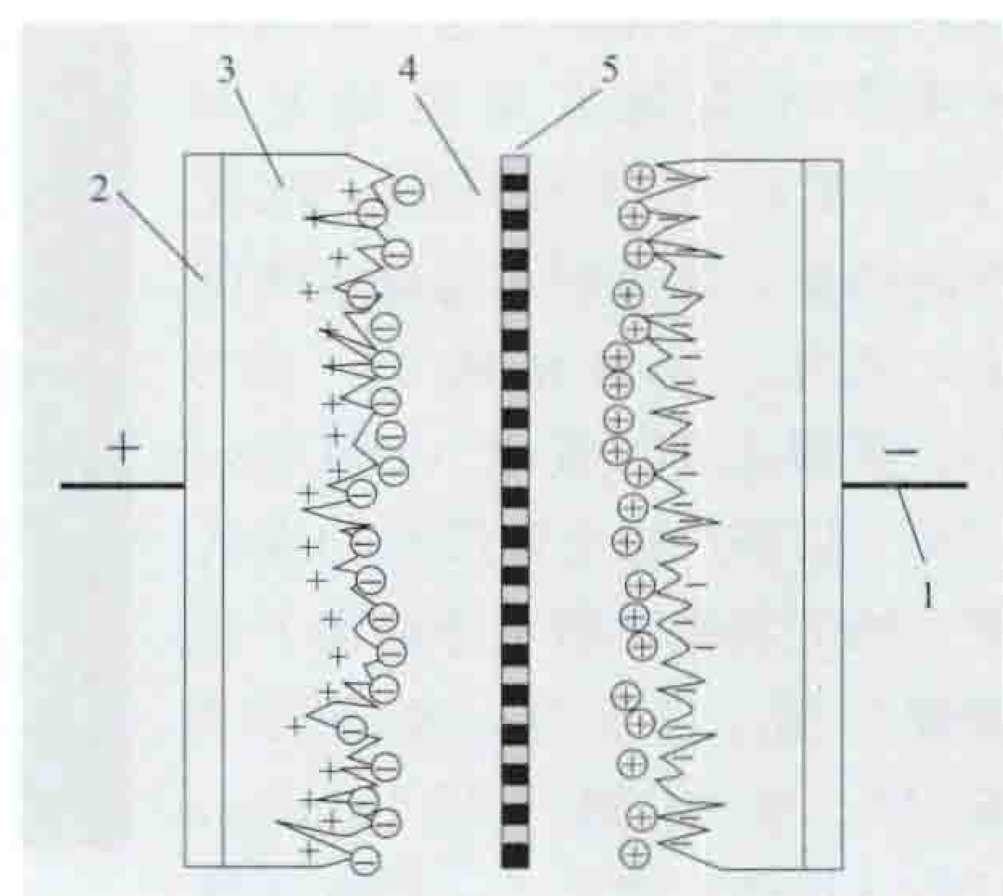
李荻．电化学原理．3版．北京：北京航空航天大学出版社，2008.

dianhuaxue dianrongqi

电化学电容器　(electrochemical capacitor，EC)

一种介于蓄电池与静电电容器之间的、将电荷分离并贮存在界面双电层中的贮能装置，又称超级电容器或大容量电容器。与传统的电容器相比，电化学电容器具有更高的比容量；与蓄电池相比，具有更高的比功率，可瞬间释放大电流，充电时间短，充电效率高，循环使用寿命长，无记忆效应和基本免维护等优点。因此，它在移动通信、不间断电源、电动交通工具及航空航天等领域具有很大的应用价值。

分类及工作原理　按贮能原理可分为双电层电容器、准电容器（法拉第电容器）和混合电化学电容器；按电极材料的不同，可分为碳基电容器、金属氧化物电容器、导电聚合物基电容器；按电解质所用的溶剂不同，可分为水系电容器和非水系电容器（有机电容器）。



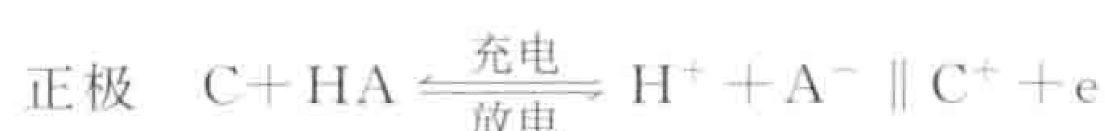
双电层电容器原理图

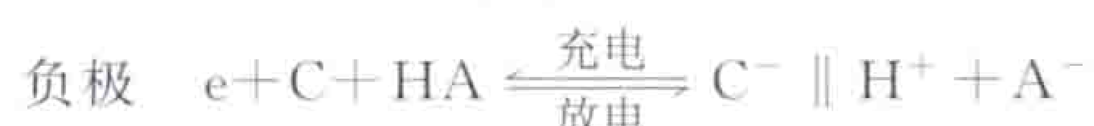
1—引线；2—集电极；3—极化电极；4—电解液；5—隔膜

双电层电容器由电极/溶液界面累积大量相反电荷（电化学极化）形成的电容器。其原理如图所示，充电时，外电路施加在金属电极的电压使得电极/溶液界面的金属一侧积蓄一定量的电荷，而溶液一侧积蓄等量的相反电荷，形成电极/溶液界面双电层结构，且这些相反的电荷间距为原子尺度（0.3～0.5nm）。放电时，负极流出电子，正极流进电子，电极/溶液界面溶液一侧的荷电离子相应减

少，双电层电荷密度减小，电极电位随之变化，直至放电结束。

双电层电容器充、放电过程的反应为







式中 C 为碳原子；‖ 为双电层；A 为负离子；e 为电子。

双电层电容由两个电容器电极组成，每个电极都有自己的电极/溶液界面双电层，电极表面和溶液离子层构成电容器的两个极板。忽略理想极化电阻，根据平板电容器理论，双电层电容器的电容为

$$C_{\mathrm{T}}=\frac{C_{\mathrm{p}}\times C_{\mathrm{n}}}{C_{\mathrm{p}}+C_{\mathrm{n}}}$$

$$C_{\mathrm{p}}=C_{\mathrm{n}}=\frac{\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_{0}S}{\delta}=C_{\mathrm{s}}S$$

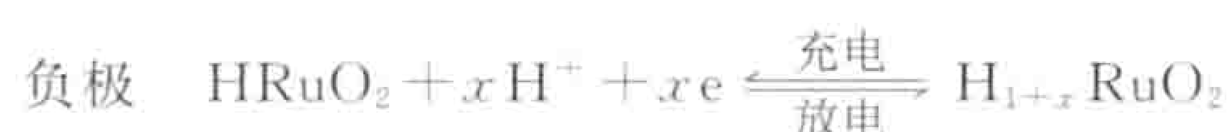
$$C_{\mathrm{s}}=\frac{\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_{0}}{\delta}$$

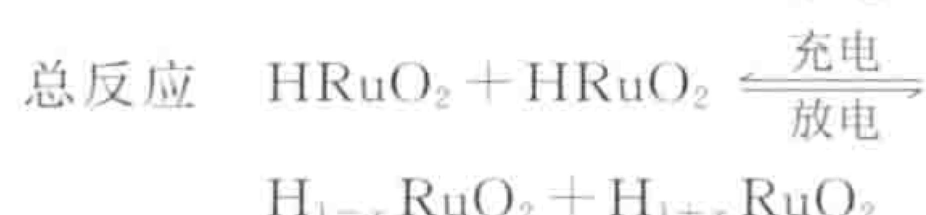
式中 C_{T} 为双电层电容器电容；C_{p} 为正极电容；C_{n} 为负极电容；S 为极板面积；δ 为极板间距，即电荷间距（0.3～0.5nm）；ε_0 为真空介电常数；ε_{r} 为相对介电常数；C_{s} 为比电容。

一般 ε_{r} 为 10 个数量级范围，因此 C_{s} 可达 16～50μF/cm²，这就是电化学电容器具有超大电容器的本质，是由电极/溶液界面双电层的自身特性决定的。实际上，双电层电容并不完全像平板电容器那样是恒定值，而是随着电极电位的变化而变化的。双电层电容的贮能是通过溶液的电化学极化来实现的，并不发生电化学反应，这正是它与准电容器的区别。

准电容器　又称法拉第电容器，其贮存电荷过程不仅包括双电层电容的形成过程，还包括电解液中的离子在电极活性物质中发生氧化还原反应的贮能过程。该过程的原理是：在极化电极表面或体相中的准二维空间进行快速、可逆、无相变的电活性物质欠电位沉积，发生高度可逆的化学吸附/脱附或氧化还原反应，从而产生与电极充电电位有关的电容。以 RuO_2 在 H_2SO_4 电解液中发生的反应为例







$H_{1-x}RuO_2+H_{1+x}RuO_2$

准电容器反应与蓄电池反应相似，但又有不同，它主要集中在电极表面完成，离子扩散路径较短，无相变产生，反应电压随电荷的充入呈线性变化，较少存在放电平台。电极材料的循环伏安曲线表现为良好的可逆性，具有这类特性的材料主要为某些金属的氧化物和导电聚合物。在电极比表面积相同的情况下，准电容器的电容在电极中是由无数微等效电容电路的网络形式形成的，其电容量直接与电极中的法拉第电量有关，所以准电容器的电容量是双电层电容器的10～100 倍。

混合电化学电容器　又称不对称电化学电容器，是利用两种不同的电极材料做正、负极，其中一个电极产生准电容，另一个电极产生双电层电容，也可以用两种不同的金属氧化物电极或导电聚合物电极组装。混合电容器的比能量比双电层电容器的大。

组成　电化学电容器单体由电极、电解质、隔膜和壳体组成。多个单体可以组成电化学电容器组。

电极是电化学电容器最关键的部件，不同类型的电极构成不同的电化学电容器体系，常用的电极材料主要有碳、金属氧化物和导电聚合物。碳电极材料（包括活性炭、碳纤维、碳气溶胶和碳纳米管材料等）做成的超级电容器，主要遵循双电层电容储能原理；由过渡金属氧化物电极材料，如 RuO_2、IrO_2、Co_3O_4、CoO_x、NiO_x、MnO_2、MoO_3、WO_3 等，以及氮化物 Mo_xN 和高分子导电聚合物电极材料制备的超级电容器，主要基于准电容器储能原理。

电化学电容器的电解质有液体电解质和固体电解质。液体电解质可分为水系和非水系两类，常用的水系电解质有 H_2SO_4、KOH、KCl、$(NH_4)_2SO_4$ 等，其电导率高，适用于大电流放电的场合。但水的理论分解电压为 1.23V，所以水系电解质只适用于工作电压为 1.0V 的电化学电容器。非水系电解质电导率较低，但分解电压高，有利于获得较高的比能量，且工作温度范围宽，使用较多的有 $(Et_4)NBF_4$/PC 等。非水系电解质的离子半径比水系电解质离子的半径大，故电极材料的孔径要大。固体电解质无电解液泄漏，稳定可靠，但电导率较低，尚未在电化学电容器中得到工业应用。

隔膜的作用是阻止电子通过，而使电解质的导电离子导通，防止电极短路，常用的有无纺布、聚丙烯隔膜、聚乙烯微孔膜、玻璃纤维、非编织尼龙及电容器纸等。

壳体将电极、电解质、隔膜封装成电容器单体。

特性　主要包括电容量、功率、能量、电压、电流、内阻、自放电、循环寿命等。

（1）电容量。一般采用恒电流放电法测定。$C=\frac{\Delta q}{\Delta V}=\frac{It}{\Delta V}$，式中 Δq 为变化 ΔV 时，电化学电容器的电量变化；ΔV 为电化学电容器的工作电压变化，$\Delta V=V_{\max}-V_{\min}$；$V_{\max}$ 为用恒电流将电化学电容器充电到规定的最高电压；$V_{\min}$ 为用恒电流将电化学电容器放电到规定的最低电压；I 为放电电流；t 为恒电流放电时间。商用电容器电容量已达 10 000F 以上。

（2）功率。其计算式为 $P_{\max}=\frac{V^2}{4R}$，式中 V 为电化学电容器额定电压；R 为电化学电容器等效串联电阻。

（3）能量。最大储能 $E=\frac{CV^2}{2}$，比能量是单位质量或单位体积电化学电容器的最大贮能，单位为 W·h/kg 或 W·h/L。

（4）电压。有额定电压和浪涌电压。额定电压是电化学电容器允许持续保持的最高工作电压，其电压值与温度、电容器的设计、寿命有关，不同的电化学电容器具有不同的额定电压。浪涌电压指允许电化学电容器短时承受的最大电压值，通常是额定电压的 1.1 倍。

（5）电流。有额定电流、最大脉冲电流和漏电流。额定电流指电化学电容器连续放电时能承受的最大放电电流。最

大脉冲电流指放电时间持续几秒的最大放电电流。漏电流与电化学电容器的自放电性能有关，当电化学电容器充电到额定电压后，如果开路存放，电压值会逐渐下降，表明有电量从电极上泄漏。给电化学电容器输入电流控制电压下降，当输入电流与泄漏电流相等时，电化学电容器保持额定电压不变，这时的电流定义为漏电流。

（6）自放电。电化学电容器充电后开路搁置期间，电压、电量、贮能随时间逐渐减少的现象。

（7）内阻。等效串联电阻。电化学电容器的内阻是各个有关部分电阻贡献的总和，包括电极、隔膜、集流体、极柱和电解液等。内阻的大小直接影响电化学电容器的高功率放电性能，也影响能量利用效率。

（8）循环寿命。电化学电容器的循环寿命可达100万次，远高于蓄电池的循环寿命。

电化学电容器的工作温度范围广，达−40～60℃，优于蓄电池的温度特性。

发展简史 1879年，德国科学家亥姆霍兹（Helmhoz，1821—1894）提出双电层概念；1957年，美国通用电气公司贝克尔（Becker）提出用电化学电容器贮存电能；1968年，美国标准石油公司（SOHIO）率先研制成功碳基双电层电化学电容器；1978年，日本开发成功商用双电层电化学电容器；1975～1981年，加拿大科学家B. E. Conway（B. E. 康维）与美国Contimental Brob Inc合作开发混合氧化物电化学电容器；20世纪80年代，电化学电容器开始市场化。1996年，俄罗斯研制的以电化学电容器为电源的电容公交车，充电一次可行驶12km，时速达25km/h。2005年，美国加利福尼亚建造了一台450kW电化学电容器贮能装置，用以减小950kW风力发电机组向电网输送功率产生的波动。

中国从20世纪80年代开始研究双电层电容器，2006年，以电化学电容器为电源的电车在上海试运行。

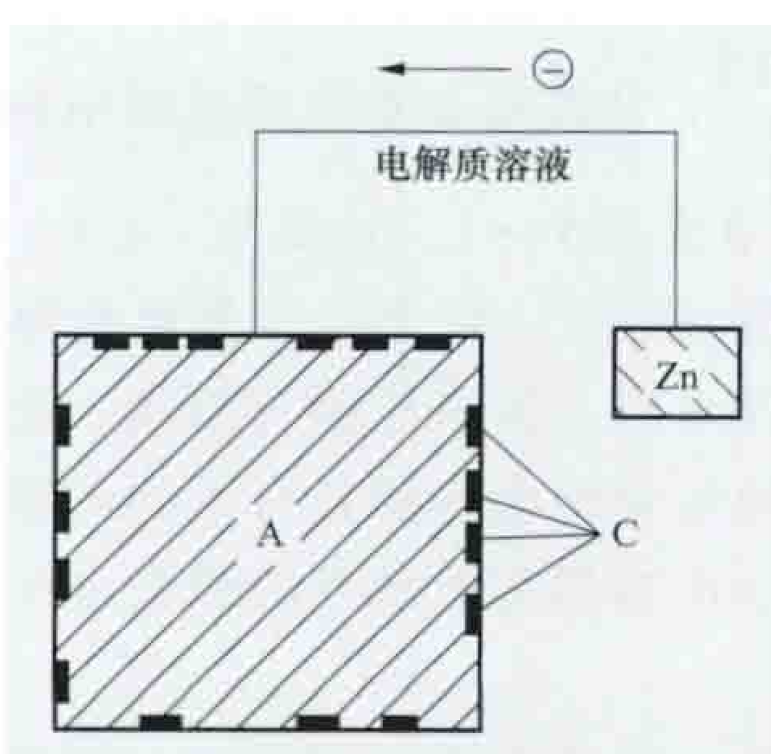
dianhuaxue fanghu

电化学防护 (electrochemical protection)

改变被保护金属的电极电位，防止金属腐蚀的方法。电化学防护有阴极保护、阳极保护两种。

阴极保护 当腐蚀原电池（见电化学腐蚀）的两极之间有电位差，并有电解质溶液存在于两极之间时，两极上即发生还原或氧化（腐蚀）反应。因此，采取措施使电极极化，以减少或消除腐蚀原电池的电极电位差，就可以抑制或减缓金属被腐蚀的过程。

阴极保护的应用范围很广，可防护在导电介质中工作的金属器件，如地下管道、地下金属设备、水槽、海水中的设备和船舶等，常与涂料并用，以减小输入电流。



牺牲阳极法阴极保护示意图

阴极保护有牺牲阳极法和外加电流法两种。

（1）牺牲阳极法阴极保护。在腐蚀原电池的阳极，即被保护金属上，连接一块电极电位更负的金属，可以防止被保护金属腐蚀。例如，在图示的钢铁结构中，有金属杂质C（阴极）和被保护金属A（阳极）组成的腐蚀原电池。在钢、铁结构上连接金属Zn，形成新的电池，其中Zn的电极电位较A的电极电位更负，为阳极，A成为阴极。电子从Zn流向A，又从A流向C，使C的电极电位向负的方向移动，产生阴极极化，使C-A腐蚀原电池的阳极电流减少，达到保护金属A的目的。Zn（阳极）则被氧化（牺牲）。

（2）外加电流法阴极保护。将腐蚀原电池的阳极直接和外加直流电源相连接。电子从外加电源的负极流向腐蚀原电池的阳极，再流向腐蚀原电池的阴极使其极化，达到保护金属的目的。

阳极保护 提高被保护金属的电极电位，使其达到钝化状态，从而保护金属不被腐蚀的方法。当腐蚀原电池的可溶阳极为被保护金属时，通入电流，使电极表面附近的离子浓度趋于饱和，析出结晶盐，固结在电极表面，阻碍电流流通，阻止被保护金属溶解。这种现象称为阳极钝化。

对可能钝化的金属，如铁、钛或不锈钢等，通入阳极电流，即可达到保护金属的目的，常用于盐酸、碱、纸浆废液等的金属容器的防腐。

参考书目

张宝宏，等．金属电化学腐蚀与防护．北京：化学工业出版社，2011.

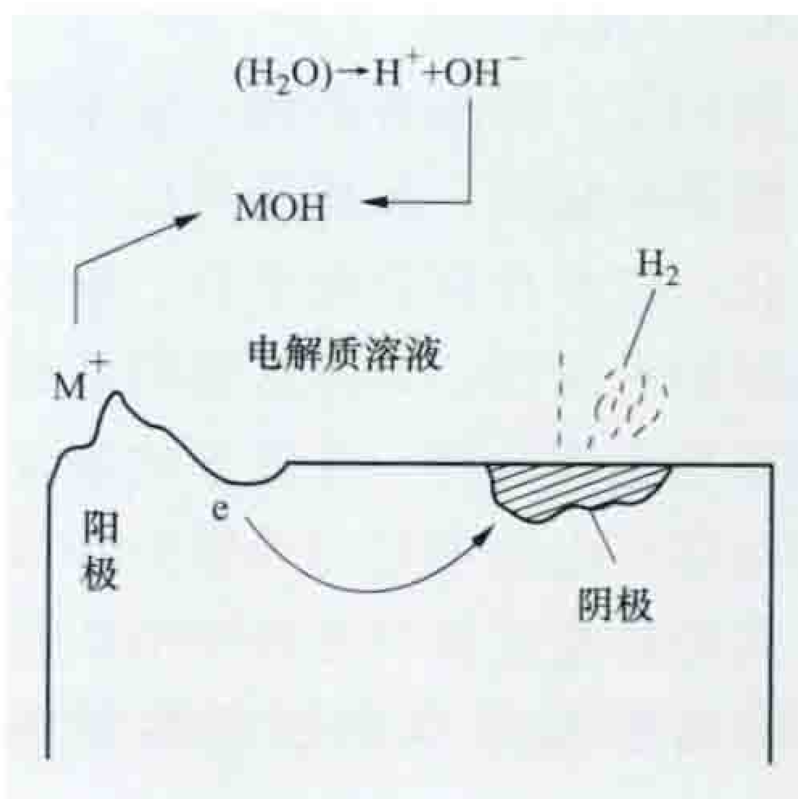
dianhuaxue fushi

电化学腐蚀 (electrochemical corrosion)

金属与电解质溶液起电化学反应而受到的损坏。电化学腐蚀是金属腐蚀的一种最普遍的形式。金属在各种盐、碱、酸的水溶液中，在海水、潮湿土壤、潮湿空气中都能发生电化学腐蚀。金属的腐蚀对人类的生产和生活危害很大。

电化学腐蚀的发生必须具备三个条件：①金属的不同部位（或不同金属间）有电极电位差；②有电极电位差的各部分必须相互接触；③有电位差的金属各部分必须同时在相连通的电解质溶液中。破坏三个条件中的任何一个，就能避免在金属上发生电化学腐蚀。（见电化学防护）

金属和电解质作用而发生腐蚀，其过程类似原电池反应，故称腐蚀原电池，分为析氢腐蚀和吸氧腐蚀，前者通常在酸性较强的电解质溶液中发生，后者通常在弱酸、中性和碱性电解质溶液中发生。被腐蚀的金属M作为阳极发生氧化反应，与之构成电对的杂质（化学性质不如金属M活泼的金属、非金属等）作为阴极发生还原反应，反应过程中，阴极析出氢气的称为析氢腐蚀，阴极吸收氧气的称为吸氧腐蚀。



析氢腐蚀原电池原理图

析氢腐蚀原电池原理如图所示，其中金属上起氧化反应的部分为阳极，起还原反应的部分为阴极。

阳极反应：金属正离子进入电解质溶液如水，成为金属的水化离子，即 $M+nH_2O\longrightarrow M^+\cdot nH_2O+e$，$H_2O$ 离解为 H^+ 和 OH^-，金属正离子 M^+ 和 OH^-

反应



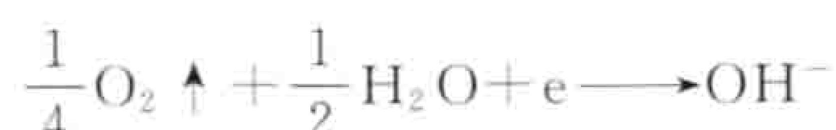
$$M^+ + OH^- \longrightarrow M^+OH^-$$

阴极反应：电子和氢离子结合、还原，产生氢气



$$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2\uparrow$$

吸氧腐蚀的阳极反应与析氢腐蚀的阳极反应过程相同。阴极反应为



$$\frac{1}{4}O_2\uparrow + \frac{1}{2}H_2O + e \longrightarrow OH^-$$

由于整个金属是一个导电体，因此腐蚀原电池是被短路的电池，不能输出电能，只能腐蚀金属。

腐蚀原电池可分为宏观电池、浓差原电池、微电池3种。宏观电池是直接接触的不同金属在大气、海水或电解质溶液中形成的腐蚀原电池。浓差原电池是金属和含氧浓度不同的电解质溶液接触而形成的腐蚀原电池。微电池则是由于金属本身化学成分、物理结构等不均匀而形成的、由极微小的电极所组成的腐蚀原电池。

dianhuaxue gongye

电化学工业 (electrochemical industry) 以电化学反应过程为基础，消耗电能或生产电源装置的制造、加工等生产事业。每一类电化学工业都是由一个电化学体系构成的，在其中进行着电化学氧化-还原反应，直接将电能转换为化学能，或制造将化学能转换为电能的装置。

发展简史 电化学工业以电池的发明为开端。1799年，意大利物理学家A. 伏打（Alessandro Volta，1745—1827）发明了电池，但直到1836年才由英国人J. F. 丹尼尔（John Frederic Daniell，1790—1845）将其工业化。同年，英国人J. B. 埃尔金顿（J. B. Elkington）利用丹尼尔电池为电源发明了电镀银的技术，随之金、铜、镍的电镀技术相继工业化。1839年，俄国人M. H. 雅科比（M. H. Jacobi，1801—1874）发明了电铸技术。1865年，J. B. 埃尔金顿公布了铜电解精炼的专利。1870年，直流发电机问世。直流大电流的获得为电解技术工业化创造了条件。1881年，法国人L. 利特伦基（L. Litrange）公布了锌电解提取锌的专利并使之工业化。熔盐电解工业开创于1886年，美国人H. Y. 卡斯特纳（Hamilton Young Castner）电解光卤石制取镁。同年，美国人C. M. 霍耳（Charles Martin Hall）和法国人P. L. T. 埃鲁（Paul Louis Toussaint Heroult，1863—1914）同时申请了电解法制铝的专利，成为百年来唯一的工业炼铝方法。电解制碱工业开创于1890年，德国用隔膜电解槽制造氢氧化钠。不久，美国人H. Y. 卡斯特纳（Hamilton Young Castner）发明水银电解法制碱，并被世界各国所采用。同年代，还发明了电解水以制取氧气和氢气的电解槽，但直到1913年合成氨工业化之后，水电解才得以工业化。

1860年，法国物理学家R. L. G. 普朗特（R. L. G. Planté，1834—1889）发明了第一个供实用的铅酸蓄电池。1868年，法国人G. 勒克朗谢（Georges Leclanché）发明了锌-锰干电池（见原电池）。1904年，美国发明家T. A. 爱迪生（Thomas Alva Edison，1847—1931）发明了碱性蓄电池。

美国人E. G. 艾奇逊（Edward Goodrich Acheson）利用电弧炉于1891年和1896年制成碳化硅和石墨。随后1877年低频感应炉和1918年高频感应炉的发明，为制造高纯金属及合金创造了条件。这些都是电热化学工业的基础。

在1885～1900年的15年间，电化学工业在欧美各国蓬勃发展。特别是在第二次世界大战期间，由于战争物资及肥料等需求猛增，电解工业及电热化学工业得到飞速发展。其后，航空、航天、电子工业的兴起，家用电器的普及，都需要大量多种纯金属、半导体材料、新型的化学电源。这些都促使电化学工业向更高的层次发展。

分类 电化学工业主要可分为电解工业、电热化学工业、化学电源工业三大类，其中很多是大量消耗电能的，如冶炼金属铝的铝电解工业，如下所示



电解工业 利用电解原理进行物质分离、提取、提纯的工业，可分为水溶液电解工业和熔盐电解工业两大类。此外，还广泛应用于金属件的表面处理和加工。（见电解）

电热化学工业 分为非金属和金属电热化学工业两大类。前者生产：①碳化物及研磨材料，如电石、碳化硅、氮化硅等；②磷系材料，如磷、磷酸、溶性磷酸等；③高熔点材料，如硼化物、碳化物、硅化物、氮化物等；④电熔物，如矾土水泥、熔融石英、熔融氧化铝砖等；⑤炭类，如人造石墨、电极等。后者生产：①钢、特殊钢、钛熔渣等；②铁合金类，如铁锰、硅锰、铁硅、铁铬、铁镍等；③非铁金属，如硅、锰、硅锰、钙硅、铝硅等。

化学电源工业 主要包括原电池、蓄电池、燃料电池、光电化学电池等的制造。原电池、蓄电池种类繁多，用途广泛，新型电池不断出现，已形成一门新兴的重要工业。

电化学工业用电 其用电特点有：①用电量大；②负荷多数平稳；③除部分电热化学工业、化学电源工业外，多为连续生产，对供电可靠性要求较高；④用电功率因数一般均较高；⑤大型整流设备常给电力系统带来一定的谐波污染。

电化学工业是耗电量大的工业。其中电热化学工业，如电石冶炼、电炉炼钢等，电解工业，如食盐电解、铝电解等，是主要的消耗电能较多的工业。化学电源工业本身虽然用电不多，但是制造电池的材料、充电等所需电力却相当多。因此，降低单位产品（产值）耗电、节约电能是电化学工业的重要课题之一。为此，可以从多方面采取措施，如设

备合理化、设备大型化、精选原料、优化原料配比、机械化、自动控制、生产过程的严格管理等，从而提高电解槽、电炉等的电效率。

dianji dianwei

电极电位 (electrode potential) 电极与溶液接触时产生的电位差，又称电极势。电极电位是一个相对值，其绝对值是无法测定的。以标准氢电极（作为阳极）与待测电极（作为阴极）组成的原电池的电极电位定义为待测电极的电极电位，以 V 为计量单位。标准氢电极是氢离子浓度为 1mol/L，氢气的压力为 101.325kPa 的电极。国际上规定，298K 时，标准氢电极的电极电位为零。

金属浸在该金属盐的电解溶液中，达到平衡时所具有的电极电位，叫做该金属的平衡电极电位。以标准氢电极作为参比电极，在温度为 298K，金属离子的有效浓度为 1mol/L（即活度为 1）时测得的平衡电极电位叫做该金属的标准电极电位。

金属的电极电位可以说明该金属得失电子的难易，电极电位愈小，愈易失去电子，性质愈活泼，相反，这种金属愈难得到电子。例如，金属钠的电极电位较小，钠原子较易失去电子而成为钠离子，而钠离子则较难得到电子而还原成钠原子。

dianji fanying

电极反应 (electrode reaction) 电流通过原电池或电解池时，在电极与它们的接触界面上进行的电子交换反应。将正、负两个电极插入电解质溶液中，接通电源，电解质中的阴、阳离子分别移向不同极性的电极，在电极上释放或接受电子，释放电子为氧化，接受电子为还原。氧化反应和还原反应是分别在两个电极上发生的，原电池的负极和电解池阳极的电极反应都是氧化反应，原电池的正极和电解池阴极的反应都是还原反应，由两电极反应组合而成的总反应为氧化-还原反应。以铜的电解精炼为例，以欲电解精炼的铜作阳极，以纯铜片作阴极，插入硫酸铜电解质溶液中，接通电源。由于阳极附近电极电位比铜的电极电位负的杂质金属很少，电极电位比铜的电极电位正的金、银又不溶解，所以阳极的主要反应是



$$Cu-2e \longrightarrow Cu^{2+}$$

电解液中 Cu^{2+} 的析出电极电位较正，且浓度较大，所以阴极上的主要反应是



$$Cu^{2+}+2e \longrightarrow Cu$$

dianji jihua

电极极化 (polarized electrode) 电极上有电流通过时，电极电位 φ 偏离平衡电极电位 φ_b 的现象，又称极化。极化或偏离的数值称为超电位 $\Delta\varphi$，$\Delta\varphi=\varphi-\varphi_b$。阳极极化时 $\Delta\varphi$ 为正值，阴极极化时 $\Delta\varphi$ 为负值。电极表面的电化学反应速度小于电子传递速度的电极极化称为电化学极化，溶液中离子传递速度小于电极表面电化学反应速度的电极极化称为浓差极化。

dianji jiare

电极加热 (electrode heating) 利用电流流过电极间液态介质产生的焦耳热对物料进行的电加热。它实质上是一种不用加热元件的电阻加热。电流通过两个或多个电极引入导电液态加热介质，由于焦耳效应，热能直接在电极间的导电液态加热介质中产生。

电极加热分为间接电阻加热和直接电阻加热两类。前者用得较多，此时被热处理的工件或被重熔电极浸入由导电液态加热介质形成的高温浴池中，通过对流传热和传导传热对物料进行加热或熔化；采用后者时，被加热物料即为导电液态加热介质，如水和熔融玻璃等，电流直接通过它产生焦耳热。

电极加热的特点是加热迅速、加热效率和生产率较高、设备简单、投资少、生产费用低。但有些液态加热介质，如某些熔融盐和金属浴会对环境造成污染。

用于电极加热的炉子称为电极炉。电极炉的结构较简单，通常由炉体、进出料设备、供电和控制系统等组成。炉体通常由炉壳、炉罐或结晶器、炉衬或隔热层以及电极系统等组成并构成浴池或容器，用来盛放导电液态加热介质、被加热工件或直接在其内成形铸件。液态加热介质可为熔渣、熔融盐、熔融金属、熔融玻璃和水等。电极由导电金属构成或为被重熔和精炼的金属棒体，插入或埋入液态加热介质中。

电极炉通常按不同的液态加热介质分类，主要有用于重型机械制造的电渣重熔炉，用于机械零件热处理的电极盐浴炉（见电热浴炉）和金属浴炉，用于玻璃制品行业的电极玻璃熔化炉（见直接电阻加热装置），一般民用的电极锅炉、电极蒸汽发生器和电极流水加热器等，以及用于在熔融盐电解过程中提炼不能从水溶液中分离的金属的电解炉。

各种电极炉，特别是电渣重熔炉发展很快，正在被广泛应用，有的电极炉，如电极玻璃熔化炉正在取代相应的燃料炉。

dianjiare

电加热 (electric heating) 利用由电能产生的热能对炉料进行加热以及由加热而引起的多种多样的工艺处理。有效的电加热过程涉及电热（电能转变为热能的过程）、传热、绝热、电能的传输和控制五个方面。电加热广泛用于各产业部门（见图 1）和日常生活中。电加热也存在于许多电气设备中，如变压器和电动机铁芯的发热以及输电导体的发热等，但这会造成无用的损耗，应设法减少。中国工业电热装置的年耗电量约占全国总发电量和工业用电量的一成和二



图 1 9000kV·A 碳化炉

成，有些发达国家则更高。因此，节电始终是采用电加热的电热装置设计和使用中的一个重要课题。

分类和应用　按电能转换成热能的不同方式，电加热分为电阻加热、电弧加热、感应加热、介质加热、微波加热、红外加热、电极加热、等离子体加热、电子束加热、辉光放电加热、激光加热和超声加热12大类。电加热还可根据电热过程发生在炉料内或炉料外分为直接电加热和间接电加热。前者的加热速度和加热效率高；后者则要通过传热把发生在炉料外的热传送给炉料。某些电加热方式，如电阻加热、电弧加热和感应加热等兼有这两种不同的加热方式。电加热已在冶金、机械、电子、化工、航天、航空、核能、轻工、医药、农业和环保等部门以及人们的日常生活中得到越来越广泛的应用。各种电加热及其相应的电热装置和应用见表。由表可知，不少电加热方式可用于电焊。

电加热及其相应的装置和应用

电加热类别	相应的电热装置和应用	电加热类别	相应的电热装置和应用
电阻加热	间接电阻加热装置主要是具有加热元件的各种电阻炉、电热浴炉、流态粒子炉等，用于金属的加热、热处理、粉末冶金烧结、钎焊等。直接电阻加热装置用于制取人造石墨、碳化硅，金属棒料、管材的加热，电阻焊等	电极加热	电渣重熔炉用于钢的重熔、精炼和铸造，电极盐浴炉用于金属件的热处理，其他电极炉分别用于热水和蒸汽的产生和玻璃的熔化等。 用于电渣焊
电弧加热	电弧炉用于炼钢，垃圾焚烧灰熔融、固化减容，熔铸耐火材料的熔化，在真空状态下熔炼难熔金属等；钢包精炼炉用于钢液的炉外精炼；埋弧炉用于制取电石、黄磷、工业硅、铁合金以及电熔耐火材料等。 用于电弧焊、埋弧焊	等离子体加热	等离子体炉用于优质合金钢、难熔金属及其合金的熔炼，高纯粉末材料化工产品的制取，垃圾焚烧灰熔融、固化回收处理等。 用于等离子体弧焊、材料切割、风洞气流的加热、煤粉燃烧器的点火，利用放电等离子体进行陶瓷与金属的烧结接合
感应加热	感应熔炼炉用于金属的熔炼或液态金属的保温；感应透热装置用于金属锭子加工（如轧制、挤压、锻压、热处理等）前的加热；感应淬火装置用于钢零件的表面加热、淬火；真空感应烧结炉用于粉末料的烧结或粉末成型零件的再结晶加热；真空感应熔炼炉用于难熔金属、合金与高纯金属的熔炼。 用于高频焊	辉光放电加热（离子加热）	离子表面处理装置用于金属、非金属材料表面镀膜，钢表面热处理，电子器件表面清理和高精度刻蚀，半导体掺杂等
介质加热	介质加热装置用于塑料、木材、橡胶、织品、玻璃、陶瓷、纸张、竹材和食品等的干燥、熔化、热合、成型、灭虫、黏结和解冻等	电子束加热	电子束炉用于优质钢、难熔金属及其合金的熔炼，材料区域提纯制取单晶，金属的焊接（见电子束焊），表面热处理，表面蒸镀，钻孔，切割，刻蚀，工业排烟处理等
微波加热	微波加热装置用于食品烹调，物料的干燥、防霉、杀菌，橡胶硫化，合成纤维染色，陶瓷烧结，酒的酿造，花粉的破壁，铀碎料的熔铸，果皮循环再利用等	激光加热	用于激光焊、激光热处理、切割、钻孔、刻蚀、医用以及激光武器等
红外加热	具有红外辐射加热器的加热炉用于涂层烤附和烘干、物料干燥、塑料成型加工、食品烘烤、农副产品加工、橡胶硫化、农作物的育苗、食品包装杀菌、医疗保健等	超声加热	超声装置用于材料或工件的加热、焊接、清洗等，应用面较窄

优缺点　与使用煤、重油、天然气等的燃料加热相比，电加热的优点主要有：加热方式多，适用面广，可用于低、中温到3000℃高温范围的加热；加热速度快、热效率高、节能；操作方便、控制容易，便于实现加热参数和加热过程的自动化控制，可满足有特殊要求的加热作业；加热功率可高度集中，有利于局部加热和表面加热；易实现在控制气氛或真空中进行加热和熔炼；可实现物料的洁净加工，对环境污染也少。电加热已是国民经济各产业部门不可缺少的工艺手段，许多高科技所需的高品质材料只有靠电加热才能制得；许多高难度的热加工，只有用电加热才能实现。电加热的缺点是：电能是二次能源，费用稍高；某些电热装置运行时对电网有不良影响，如电弧炉引起的闪变、采用半导体变频电源产生的谐波干扰等，或对无线电通信有干扰，如某些高频率的加热电源；通常一次投入较大。

历史与发展　19世纪末，电阻加热、感应加热、电弧加热相继开发。随着电力工业的发展，20世纪30年代电加热已在工业上得到广泛应用，并逐步形成工业规模。其后半个多世纪，特别是20世纪60年代以来，电加热技术得到迅猛发展，其他电加热方式相继问世，技术上也日趋完备，电加热的应用由冶金（见图2）、铸造、热处理、锻造、焊接等工业应用领域迅速扩展到食品加工，涂饰干燥，合成纤维染色，橡胶连续硫化，树脂成型、硬化，木材弯曲成型加工，农副产品加工，医药制品杀菌，工业除尘，垃圾焚烧灰熔融固化，环境保护乃至家庭烹调、采暖、医疗、保健等各个领域。随着电加热技术和电热装置的发展，水电、核电以及太阳能和风能等可再生发电的广泛采用，人们环保意识的进一步提高和对生活品质的追求，安全、方便、清洁、节能的电加热必将在21世纪迎来更广阔的发展前景。



图 2　方坯在线感应加热设备

dianjiare jiedian jishu

电加热节电技术　(electricity saving technology of electric heating)　降低电加热设备及其工艺中电能消耗的措施与方法。电加热的种类很多，有电阻加热、电弧加热、感应加热、电子束加热、等离子体加热、介质加热等，对应的有电阻炉、盐浴炉、电弧炉、电阻电弧炉、感应炉、电子束炉、等离子炉、高频加热设备等不同的电加热炉或电加热设备。按工作频率划分，主要有低频、工频、中频、高频、微波、红外等数种。随着技术进步，一些高耗能的电加热装置已被淘汰，而节能效果好、适用范围广的高效电加热技术，在冶金、机械、化工、纺织、轻工、食品、医药、电子等行业中得到广泛应用。

电加热节电技术主要有远红外加热技术，微波加热技术，中、高频感应加热技术。

远红外加热技术　利用远红外辐射元件发出的远红外线，使被加热物体吸收，直接转变成热能的一种加热方式。按温度等级，远红外加热技术可分为低温加热、中温加热、高温加热三个等级。与传统的加热方法相比，远红外加热的优点：①可缩短热处理时间，提高热处理质量，最短的时间内使加热部件达到规定的温度、湿度；②能减少加热部件表面单位面积上的热量或燃料消耗量；③能按规定的程序控制加热过程，获得最佳工艺效果；④红外辐射装置可作为主动部件列入自动化生产线，实现加热工艺自动化，提高工效；⑤设备占地面积小，生产费用低。应用范围：农业、化工和制药、机械加工、金属冶炼、食品加工、医疗、纺织等领域。

微波加热技术　利用介质损耗原理，采用超高频电场对物体进行加热的一种方法。微波加热是使被加热物体内外同时加热，具有时效性、整体性、选择行、高效性和安全性等特点。与传统加热方式相比，微波加热的优点：①加热速度快、加热均匀、热量损失小、效率高；②可选择性加热；③控制及时、反应灵敏；④穿透能力强；⑤低温杀菌无污染，安全无害。应用范围：干燥和杀菌、食品加工、矿业和金属冶炼、陶瓷加工、化工、环保、医疗以及吸附剂（如活性炭）等领域。但微波加热技术应用受到材料结构的限制（材料分子结构不同，微波吸收程度不同），有一定的局限性，还需要做好微波防护工作。

中、高频感应加热技术　通过控制工作电流的频率实现对金属物体加热的一种方法。它将工频 50Hz 交流电转换成频率为上百赫兹或 1kHz，甚至频率更高的交流电，利用电磁感应原理，对金属物体进行加热深度控制，既能提高加工工艺的质量，又可保证能量被充分利用，加热效率高。对需要加热深度大的工件，可降低工作电流频率，需要加工深度小时，可升高工作电流频率。对于体积较大的工件，选择中频加热方式，对体积较小的工件或管材、板材，则选用高频加热方式。中、高频感应加热的优点：①加热速度快，被加热物的表面氧化少；②加热温度高，温度易控制，工件加热均匀，产品质量好；③非接触式加热；④作业环境好，无污染、无噪声、无灰尘；⑤容易实现自动控制，安全可靠，易于操作，可不间断连续工作；⑥占地面积小，生产效率高。应用范围：金属冶炼、机械、食品加工等。

表中给出了按行业划分的三种主要高效节能加热方式的应用情况。

三种主要高效节能加热方式的应用情况

应用领域	远　红　外　加　热	微　波　加　热	中、高频感应加热
冶金工业	在低熔点有色金属的冶炼方面应用相对较多，如铝、铜等的冶炼。 特点：节能、环保。但由于温度限制，在高熔点合金冶炼方面的应用受到局限	由于金属对微波具有反射作用，因此不能直接用于金属熔炼。 在金属冶炼行业只能作为辅助手段，对矿石进行预处理，提高贵重金属析出率	适合各种合金的熔炼等，适用于高熔点金属冶炼以及硬质合金的烧结。 由于感应加热线圈感应发热等，会造成能量损失，降低了利用效率
机械制造业	适合于油漆层的固化与干燥；金属等材料的热处理，特别是回火退应力方面应用较多；铸模与型芯的干燥；金属锭锻压前的加热；低熔点金属和玻璃等焊接与钎焊等。适合相对较低温度的机械加工工艺	适用于模具的干燥等	可以用于金属材料的热处理，特别是淬火，提高工件硬度和表面质量方面应用较多；金属加工前的快速加热，如金属管的弯管、扩径等方面；可减少加热时间，减少金属表面氧化，提高产品质量。适合较高温度级别的机械加工工艺
化学和橡胶工业	试剂干燥；塑料等聚合材料的加热；合成橡胶、塑料等的热处理；橡胶的硫化；工业织物和填料的干燥	炭表面活性改性；有机化合物合成；有机物分离；橡胶的硫化和再生橡胶的脱硫；玻璃纤维加热强化；注塑树脂的预热等	应用较少

续表

应用领域	远红外加热	微波加热	中、高频感应加热
陶瓷与建材行业	瓦片、瓷砖干燥；薄陶瓷生产；陶土料、混凝土零件、空心制件以及石膏混凝土板、木材的干燥等	高纯度陶瓷的制备；陶瓷原料的粉碎；陶瓷的焊接；陶瓷生坯的干燥；特殊隔热材料的干燥等	应用较少
纺织工业	人造丝和棉纱轻线的干燥；织物整饰聚合；尼龙和贝纶布的强化等	织物的加热染色；织物的干燥等	应用较少
制革与制鞋	染色和本色皮革、皮毛、鞋零件的干燥；胶膜的活化；聚乙烯鞋底的熔接；合成材料合成前的增塑；鞋面的上光等	毛皮、皮革干燥等	应用较少
造纸行业	纸张、纸板、油纸在造纸机上的干燥等	纸板干燥	
印刷	印刷颜料、排版纸型、轮转机取下的校样、油漆层、照相制版等	印刷颜料、排版纸型、轮转机取下的校样、油漆层、照相制版等	应用较少
医学和制药	试剂和制剂的干燥	中草药及其制品干燥；制药行业干燥与合成加热等	应用较少
食品工业	谷物、蔬菜、水果、砂糖、烟草、糕点、烟叶等制品的干燥；面包、饼干、蛋糕的烘制；肉类、灌肠类制品、鱼类的烤、煮、熏制；面粉和谷物的杀虫，罐装水果的果皮清洁与漂白；啤酒、牛奶、果汁的灭菌；冷冻食品解冻等	米、面等粮食、糕点、带馅食物如月饼等食物的烘烤与杀菌；海蜇、低盐榨菜、方便面汤料以及火锅汤料杀菌与保鲜；豆制品、牛奶等杀菌；荔枝保鲜等；烟叶等制品的干燥；食物烹饪；食物的存储加工；食品解冻等	烹饪，食品加工等
建筑业	建筑物的采暖等	应用较少	应用较少

dianjie

电解

（electrolysis）　在电解槽中，直流电通过电极及电解质，在电极和电解质接触的界面上发生电化学反应，以制备所需产品的过程。电解的电化学式可表示为：电极｜电解质｜电极，其中“｜”表示界面。电解过程中发生的电化学反应为氧化-还原反应，所用能量是电能，不使用其他燃料、氧化剂、还原剂等，所以能得到非常纯净的制品。此外，应用电解原理还可对金属件及非金属件作表面处理和加工。电解技术是工业生产中极为重要的工艺方法之一。

发展简史　1807年，英国人H. 戴维（Humphry Davy，1778—1829）电解熔融苛性碱制得钾、钠，开创了制备高纯物质的新途径。1870年，直流发电机问世，为电解技术的工业化创造了物质条件。1886年，美国人C. M. 霍耳（Charles Martin Hall）和法国人P. L. T. 埃鲁（Paul Louis Toussaint Heroult，1863—1914）电解制铝成功。1890年，电解氯化钾制取氯工业化。1897年，水银电解法制烧碱实现工业化（见食盐电解）。1937年，利用电解法生产有机化学产品工业化。

原理　将两片导电电极插入电解质中，接通直流电源，电解质中处于无秩序运动的离子即做定向运动（见图1）。阴离子移向阳极，在阳极失去电子被氧化；阳离子向阴极移动，在阴极得到电子被还原。在阴、阳电极上发生的这种反应分别称为阴极反应和阳极反应。

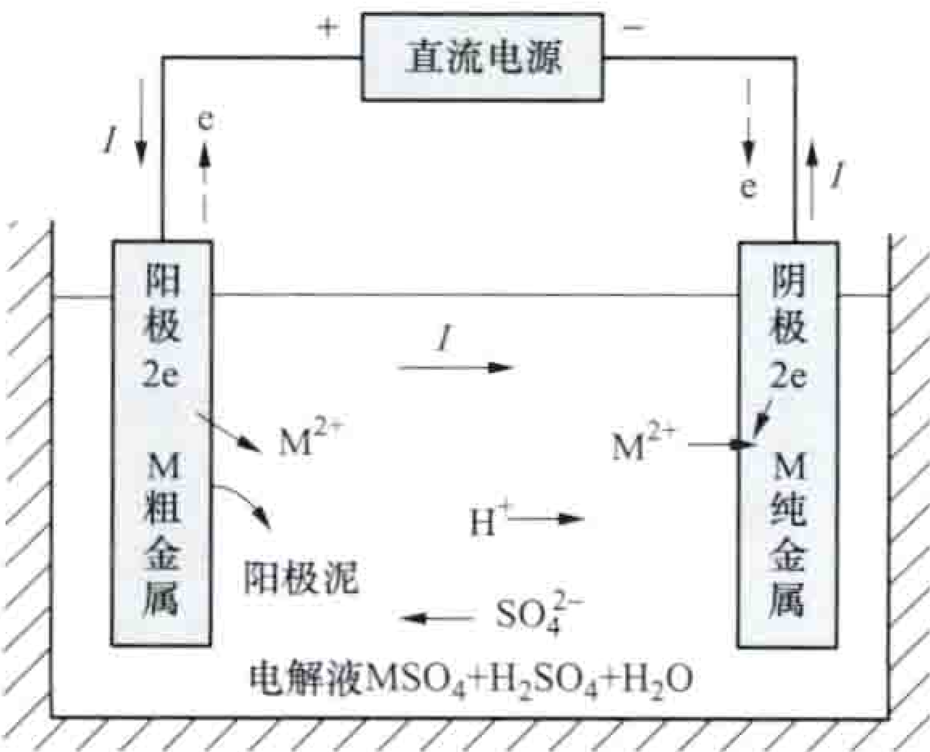


图1　电解原理示意图

在金属电解精炼过程中，残留在阳极表面和沉于槽底的不溶性泥状物称为阳极泥。粗金属中所含的金、银、硒、碲等几乎都留在阳极泥中。阳极泥是提取贵金属的重要来源之一。

电解过程的电能效率是电流效率和电压效率的乘积。

电流效率　阴极上实际析出产品的量与理论析出量之比的百分数。影响电流效率的因素有：①阳极和阴极之间因短路而产生的漏电；②通过电解质向大地漏电；③阴极杂质金属等电解反应（副反应）所消耗的电能；④产品的再溶解。

电压效率　电解质的理论电解电压与实际电解电压（电解槽槽电压）之比的百分数。电解槽槽电压的计算公式为

电解槽槽电压＝理论电解电压＋超电压＋输电导体电压损失

式中理论电解电压相当于电极电位，超电压相当于超电位（见电极极化）。通常电解槽电压远大于理论电解电压。因此，降低超电压和输电导体的电压损失是提高电压效率的关键。影响超电压的因素有：电极材料和电极间距，电解质组成、温度、浓度、pH值等。此外，影响电解槽电压的因素还有导电体和电极之间的接触电压、隔膜材料、电解槽结构、电流密度等。电解槽的发展多集中在改善电解槽的结构和电极材料上。

电解体系　按电解质的不同，可分为水溶液电解和熔盐电解两类，其电解原理是相同的，电解体系均由电极、电解质、槽体、直流电源等部分组成。两类电解体系的组成部分虽然相同，但在电极、电解质、槽体等的材料、形状等方面有很大的区别。

水溶液电解　电解质为酸、碱、盐等能导电的水溶液。

（1）电极。电解体系中向电解质输入和导出电流的端部导电物质，通常为金属，也可为非金属导体。电流经过并流向电解质的电极称为阳极（电解精炼时的粗金属），电流从电解质流向电极并流回电源的电极称为阴极（电解精炼时的纯金属）。

在水溶液电冶金中，阳极又可分为可溶阳极和不溶阳极两类。电解精炼金属时，由粗金属制成的并在电解过程中逐渐溶解在电解液中的阳极称为可溶阳极。从含金属离子的水溶液中电解提取金属时，仅起导电作用而不溶解的阳极称为不溶阳极。化学工业中，电解采用的阳极通常为不溶阳极。20世纪60年代出现的金属氧化物电极是阳极材料的重大革新。

在水溶液电解中，提纯或提取的金属析出在阴极上，所以多用被精炼或提取金属的纯金属薄片作阴极，也可用其他金属或合金板作阴极，使金属析出在此阴极板上，待到一定厚度时，用人工或机械将析出金属剥离。阴极板经过一定处置后可再置入电解槽中继续使用，此种阴极也称为永久性阴极。化学工业中，常用低碳钢作阴极，若电解液为硫酸水溶液，则用铅或石墨作阴极。较常使用的多孔镍镀层阴极可以降低电能损耗。

（2）电解液。由某种物质溶解在特定的溶液中制成的具有离子导电性的液体介质。水溶液电冶金中的电解液多为产品金属盐的水溶液。对电解液的性质有如下要求：①对阳离子的溶解度高、电导率高；②阳离子的化学稳定性好；③价格低廉；④能得到平滑的电解沉积层。根据电解生产产品的不同来选择适当的电解液。

为改善阴极析出状态，往往在电解液中添加少量有机物或无机物作为添加剂。

（3）槽体。水溶液电冶金电解槽槽体呈长方体，材料为钢材、水泥、陶瓷等。对腐蚀性的电解液，钢或水泥槽内需衬以铅、合成树脂、玻璃钢或橡胶等。此外还有整体树脂混凝土电解槽，如呋喃树脂和乙烯基树脂混凝土电解槽等。在槽的长边上装有导电棒或母线，多块阳极和吊挂在横导电棒上的阴极互相间隔、平行，垂直悬挂在槽体中（见图2）。将很多这样的单槽串联起来，即组成了与电源相接的槽系列，如图3所示。

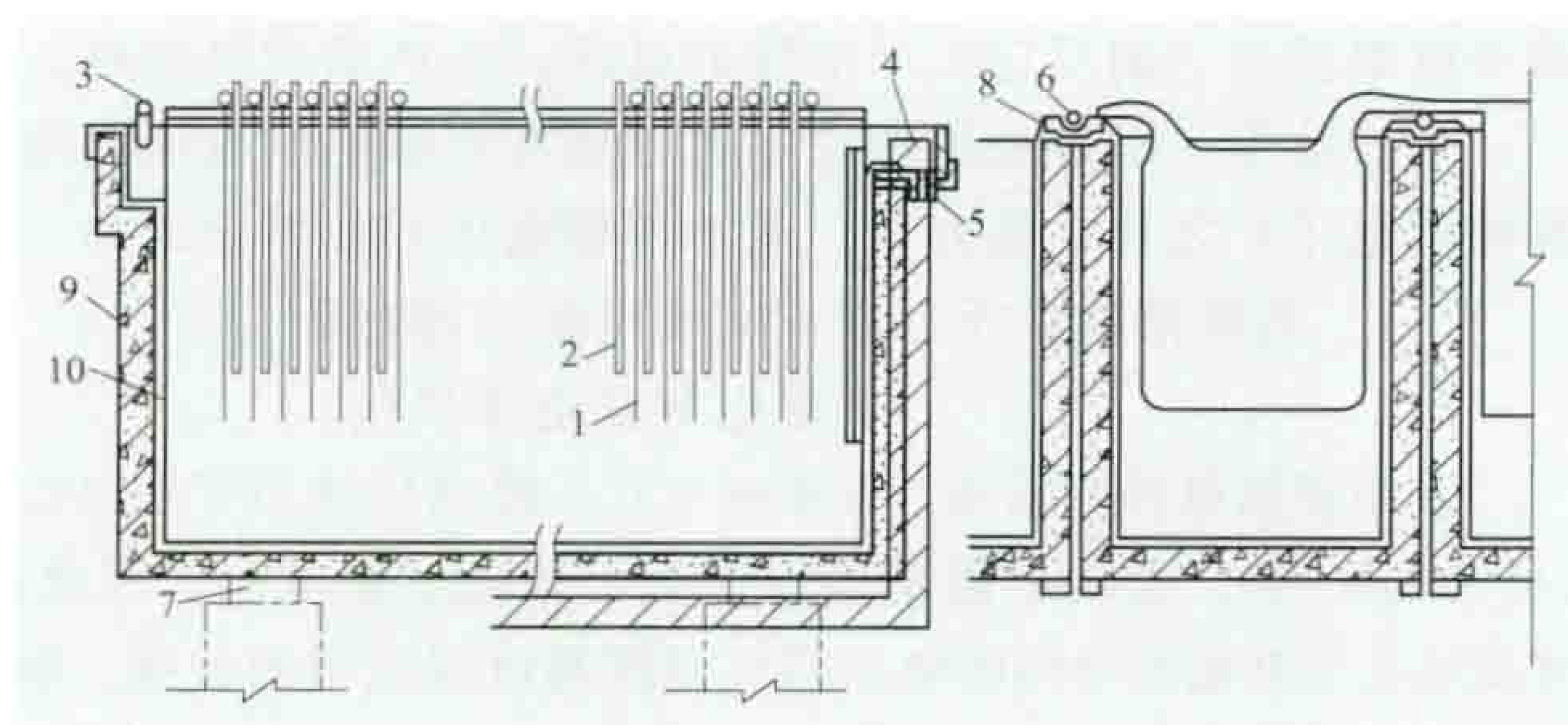


图2 水溶液电解槽结构

1—阴极；2—阳极；3—进液管；4—溢流槽；5—回液管；6—槽间导电棒；7—绝缘瓷砖；8—槽间瓷砖；9—槽体；10—衬里（整体树脂混凝土电解槽无该项）

有些工业，特别是化学工业中用的电解槽，常用隔膜把阴、阳极隔开，以防止阴、阳极产物混合发生有害反应，这种电解称为隔膜电解。隔膜应能防止阴、阳极两室中电解产物的相互扩散和作用，在金属水溶液电解过程中应能防止杂质金属进入阴极室。隔膜要有一定的孔隙率、化学稳定性和机械强度，多用惰性材料如石棉、陶瓷、有机合成材料等制作。水溶液电解槽正向大型、低能耗方向发展。

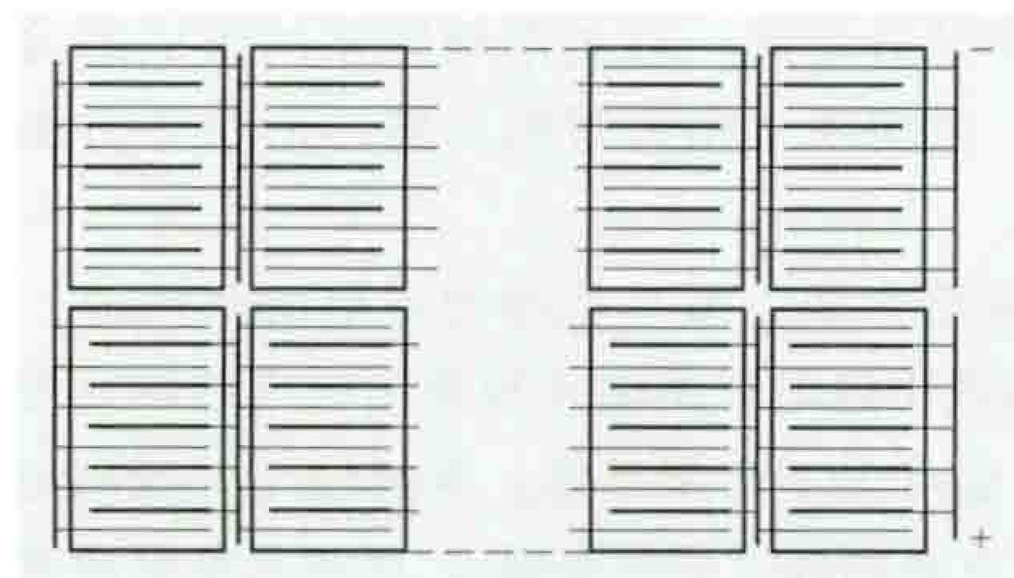


图3 电解槽系列的供电示意

熔盐电解 以熔融盐为电解质进行的电解。其熔融温度在643～1253K之间，高温操作是其特点，多用于铝、镁等轻金属和稀有金属的生产，也用于氟、硼、硅等的生产。熔盐电解常需消耗大量电能。

阳极多用石墨或碳，但电解氢氧化钠时则使用铁、镍或镍钢。阴极一般用石墨或碳，但当电解质为氯化镁、氢氧化钠，且与铁不发生反应时，则使用铁作阴极。

电解质为熔融状态的盐，主要是卤化物。熔盐应具有较低的熔点，适当的黏度、密度、表面张力，高电导率，低挥发性和不熔解被电解出来的金属熔体等性质。为此，常用由几种盐类组成的混合盐，如电解铝用 Na_3AlF_6-Al_2O_3 混合熔盐，电解镁用 $NaCl$-KCl-$MgCl_2$ 混合熔盐。

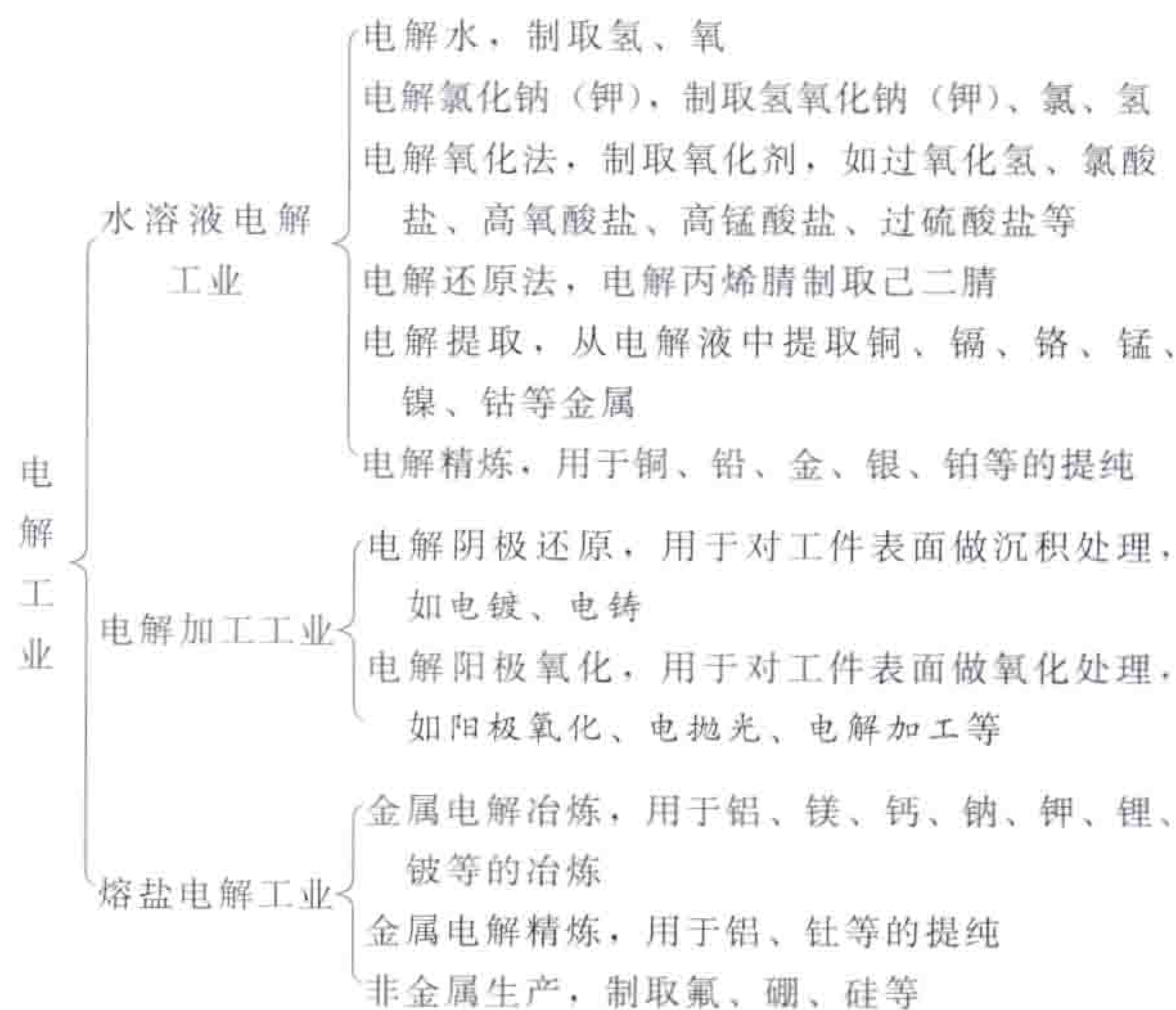
槽体的结构材料多用钢材，耐火材料主要使用石墨。

因产品不同，电解槽体、阳极、阴极的形状也各不相同，如铝电解槽的结构和食盐电解槽的结构相差较大等。

电解电源 电解用直流电源有电压低、电流大的特点，电压在30～1200V，电流在0.3～600kA。电解工艺的不同，对电压调节范围、电流稳定度等的要求也不同。

1870年，直流发电机的发明为电解的工业化创造了条件。以后，相继应用过汞弧整流器、机械整流器等作为电解直流电源。1956年发明了锗整流二极管，1958年研制出晶闸管，并迅速向大功率、高电压方向发展。用其组成的整流器已成为电解用直流电的主要电源设备。（见电解直流电源）

电解工业 利用电解原理进行物质分离、提取、提纯的工业，可分为水溶液电解工业和熔盐电解工业两大类。此外，还广泛应用于金属件的表面处理和加工。电解工业分类和用途如下所示。水溶液电解工业是利用电解原理生产氢、氯和氢氧化钠等，精炼或提取金属（如铜、锌等），做金属表面处理或加工（如电镀、电铸等）。熔盐电解工业是利用电解原理提取稀土元素（如铝、镁、钠等）、高熔点稀有金属（如钛、锆、铊、钽等）、放射性元素（如铀、钍等）。



水溶液电解工业中的金属精炼和提取、熔盐电解工业以及电热化学工业中的电热冶金，又合称电冶金。

参考书目

哈曼CH，等．电化学．陈艳霞，等，译．北京：化学工业出版社，2010．

dianjiecao muxian duanjie kaiguan

电解槽母线短接开关 (bus short-circuit switch for electrolytic tank)　一种可带负荷操作的，能承载、关合和开断直流大电流母线正常工作电流的电气设备。通过电解槽母线短接开关合闸的操作，使电流流入旁路母线上，从而使电解槽在不停电的条件下起、停槽，是电解生产的重要设备。

电解槽母线短接开关的主要结构包括动触头、静触头、操动机构、控制部分等。主要依靠动触头的移动完成分断与接通直流电路的功能。其特点包括：①用于户内，并且便于安装、调试与维护；②具有较强的耐恶劣环境能力；③具有较高的机械寿命及电气寿命；④开关分、合闸时间短，同期性高，具有较好的过载运行能力；⑤具有手动、自动操作方式，操作灵活，便于现场检修和远程控制；⑥触头采用银合金，便于更换，并且具有较强的耐电弧能力；⑦具有辅助开关，用于电气回路联锁等。

电解槽母线短接开关按照安装方式可分为固定式（见图1）和移动式（见图2），按照冷却方式可分为空气冷却和水冷却。在操作方式上，有气动或电动两种方式，操动机构为弹簧机构或永磁机构。一般电解槽母线短接开关应在就地控制箱或控制室进行操作，只有在应急情况下，才采用专用手柄在开关本体上进行操作。



图1　固定式短接开关



图2　移动式短接开关

电解槽母线短接开关主要应用于电解行业，中国产品额定电压可以达到DC 60V，额定电流可以达到DC 60～70kA，国外应用于大型铝电解、氯-碱槽电解的移动式水冷短接开关，其额定电流可以达到DC 70～250kA。短接开关在铝电解槽的应用见图3。



图3　短接开关在铝电解槽的应用

dianjie dianyuan zhengliu dianlu

电解电源整流电路 (rectifying circuit of electrolytic power supply)　利用电力半导体器件的单向导电特性，将交流电转变为直流电作为电解电源的导电回路。整流电路是直流电源的核心部分。由该电路所组成的整流器，其交流侧接三相电力网，直流侧输出为直流。整流器在接受电力网电能的同时，也将谐波电流"注入"电力网，使电力网电压发生畸变，恶化电力网及用户的运行条件。电解工业用整流器有电压低、电流大、功率大的特点，相对来说，其对电力网的谐波污染程度较严重。消除或减缓这种谐波污染的有效措施之一是改进整流器的整流电路。

用整流管组成的电路称为不可控整流电路，用晶闸管组成的电路称为可控整流电路。两者都可以组成单相、三相或多相整流电路。提高整流电路相数可以降低谐波污染的程度，增加输出直流的平滑程度，但也相应增加了整流器的复杂程度。

在讨论整流电路的工作状态时，是以下列理想条件为基础的：①整流管、晶闸管的正向电阻为零，反向电阻为无限大；②直流电路连接线短的小型电解负荷，按纯电阻负荷处理，对有滤波电抗器的大型电解负荷，则按无限大电感负荷处理；③有无限大功率的电源是对称电源，供电电压无畸变。

电解电源常用的整流电路有三相桥式可控、三相桥式同相逆并联、带平衡电抗器的双反星形、12相整流电路等。

三相桥式可控整流电路　如图1所示，三相桥式可控整流电路实际上是由两组三相半波整流电路串联构成的。一组为共阴极组，另一组为共阳极组，共用同一交流电源，在二次侧电压相同、负荷相同、延迟角 α 相同的情况下，两组负荷的直流平均电流 I_{d1} 与 I_{d2} 大小相同，但相位相反，$I_{d1}-I_{d2}=0$，故取消了共用的O-O′连线。

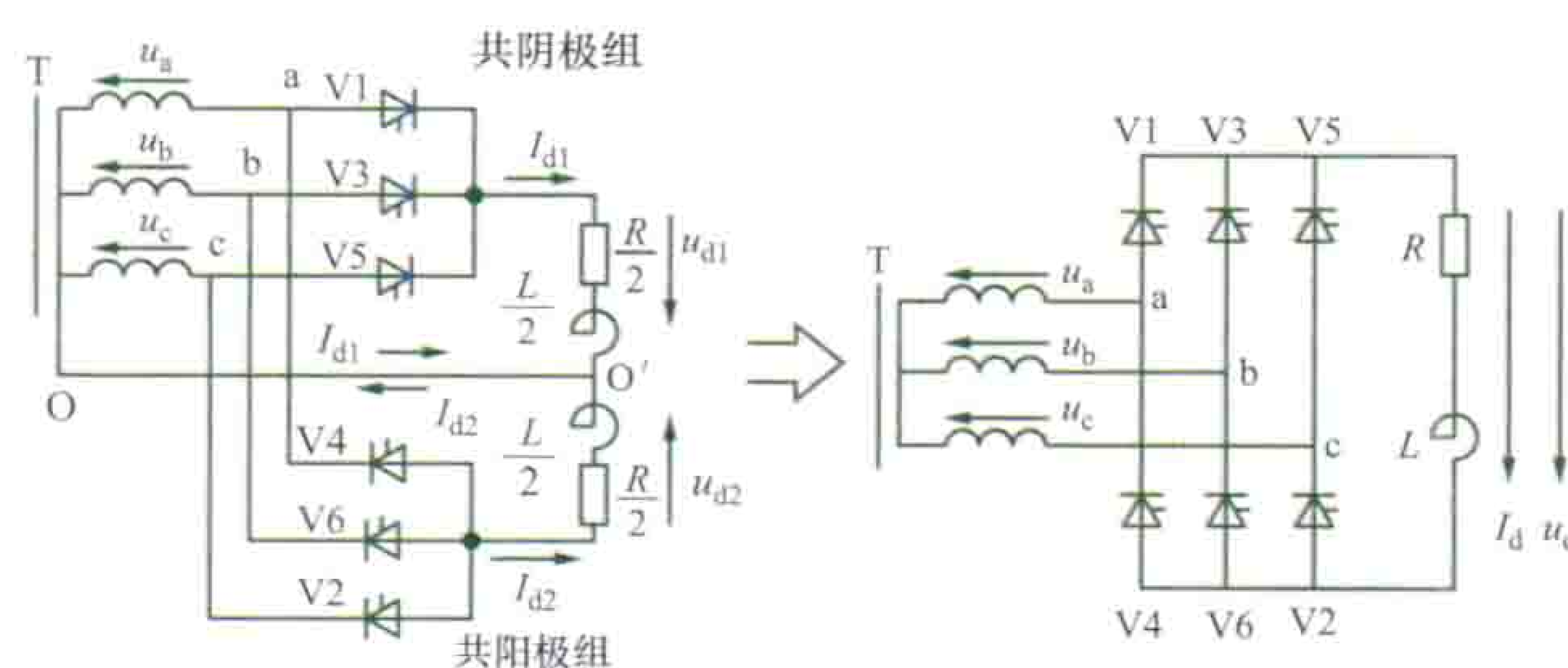


图1　三相桥式可控整流电路

三相桥式可控整流电路由线电压 u_{ab}、u_{ac}、u_{bc}、u_{ba}、u_{ca}、u_{cb} 轮换起作用。$U_{ab}=U_{bc}=U_{ca}=U_{21}$，$U_a=U_b=U_c=U_2$。三相桥式可控整流电路工作时，必须有两个晶闸管同时导通（阴、阳极组中各一个），才能对负荷供电。根据换相顺序，每隔 $\pi/3$，就有一个晶闸管换相。为了保证不换相的晶闸管可靠导通，必须同时为规定导通的一对晶闸管送入门极触发脉冲电流。

给晶闸管送触发脉冲电流有两种方法，第一种称为双窄脉冲法，第二种称为宽脉冲法。双窄脉冲法对产生脉冲的触发电路要求较高，其结构及调试都比较复杂，然而脉冲前沿较陡，所需功率较小。宽脉冲法的触发电路比较简单，调试

也较容易，但脉冲前沿不宜陡峭，脉冲宽度要大于60°，所需功率较大。

三相桥式可控整流电路的输出电压 u_d 的波形，在电源一个周期内，有6次脉动。

直流平均电压

$$U_d=\frac{1}{\frac{\pi}{3}}\int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha}\sqrt{2}U_{21}\sin\omega t\,d\omega t$$
$$=1.35U_{21}\cos\alpha$$
$$=2.34U_2\cos\alpha$$

直流平均电流

$$I_d=\frac{U_d}{R}=\frac{2.34U_2}{R}\cos\alpha$$

当 $\alpha>60°$ 时，输出电压 U_d 的波形部分将出现负值，这是由于电感释放磁能的缘故。$\alpha=90°$ 时，$U_d=0$。$\alpha>90°$ 以后 U_d 总是零，故延迟角 α 的移相范围是0°～90°。

三相桥式同相逆并联整流电路 由于硅整流机组单机电流日渐增大，机组变压器二次侧常有几套绕组各带整流柜并联运行，从而出现了柜间、相间、臂间、整流元件间的均流问题。机组电流越大，电流磁场以及各部分阻抗的不对称对均流的影响越严重。为了解决这些问题，出现了三相桥式同相逆并联电路，其特点是将两个整流系统组合在一起，两系统邻近部分线路内流过的电流，在任何瞬间均大小相等方向相反，从而减少了各部分线路电抗，并增加了相间、臂间阻抗的对称性。

图2所示为两个三相桥式系统组成的同相逆并联整流电路，整流变压器二次侧有两组极性相反、三角形或星形连接的三相绕组，当图中一个桥的导电相序为ab、ac、bc、ba、ca、cb时，相应的另一个桥的导电相序为b′a′、c′a′、c′b′、a′b′、a′c′、b′c′，将两个桥组合在一起，即使得任何瞬间两桥相邻线路内的电流大小相等、方向相反，磁通得到最大限度的抵消。

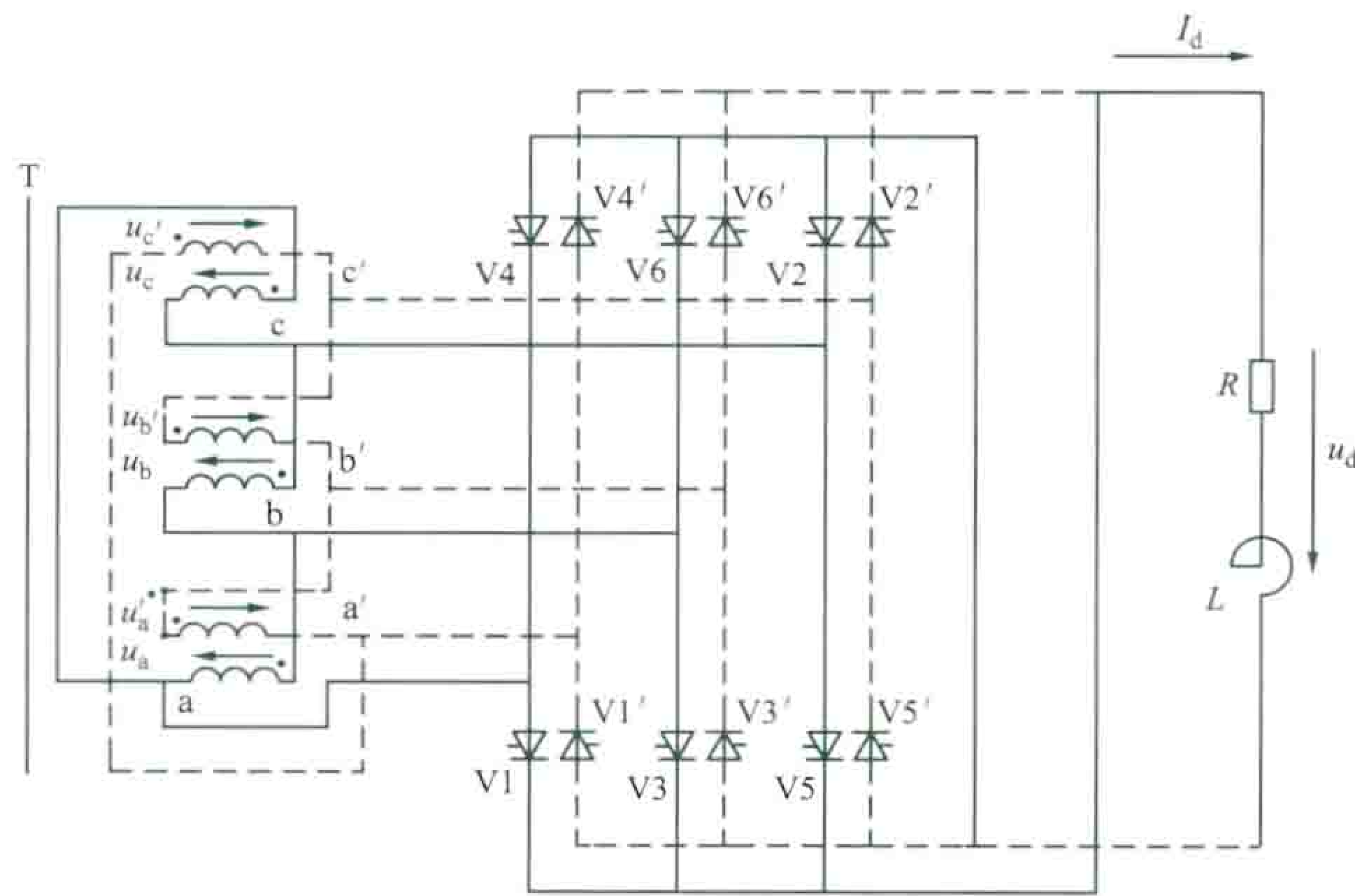


图2 三相桥式同相逆并联整流电路

带平衡电抗器的双反星形整流电路 如图3所示整流变压器二次侧有两组极性相反、星形连接的三相绕组，并联接入平衡电抗器 L_p。L_p 是有中心抽头的单相铁芯电抗器，两部分匝数相等，绕向相同，每绕组只供给负荷电流的一半。极性相反的两绕组可以消除整流变压器中的直流磁通势。

平衡电抗器的作用：①平衡Ⅰ、Ⅱ组绕组中点O与O′间的瞬时电压差，保证在每个瞬时Ⅰ、Ⅱ组绕组中各有一相和晶闸管导通，使两相绕组能并联向负荷供电。②限制交变的环流 i_p 值，使负荷电流能均衡地分配到两相导通的绕组中，每相和每个晶闸管导通时间为 $2\pi/3$。如果不接平衡电抗器，每个瞬时，Ⅰ、Ⅱ组绕组中相电压高的就和所连接的晶闸管导通，每相导通时间为 $\pi/3$，于是成了6相半波可控整流电路。

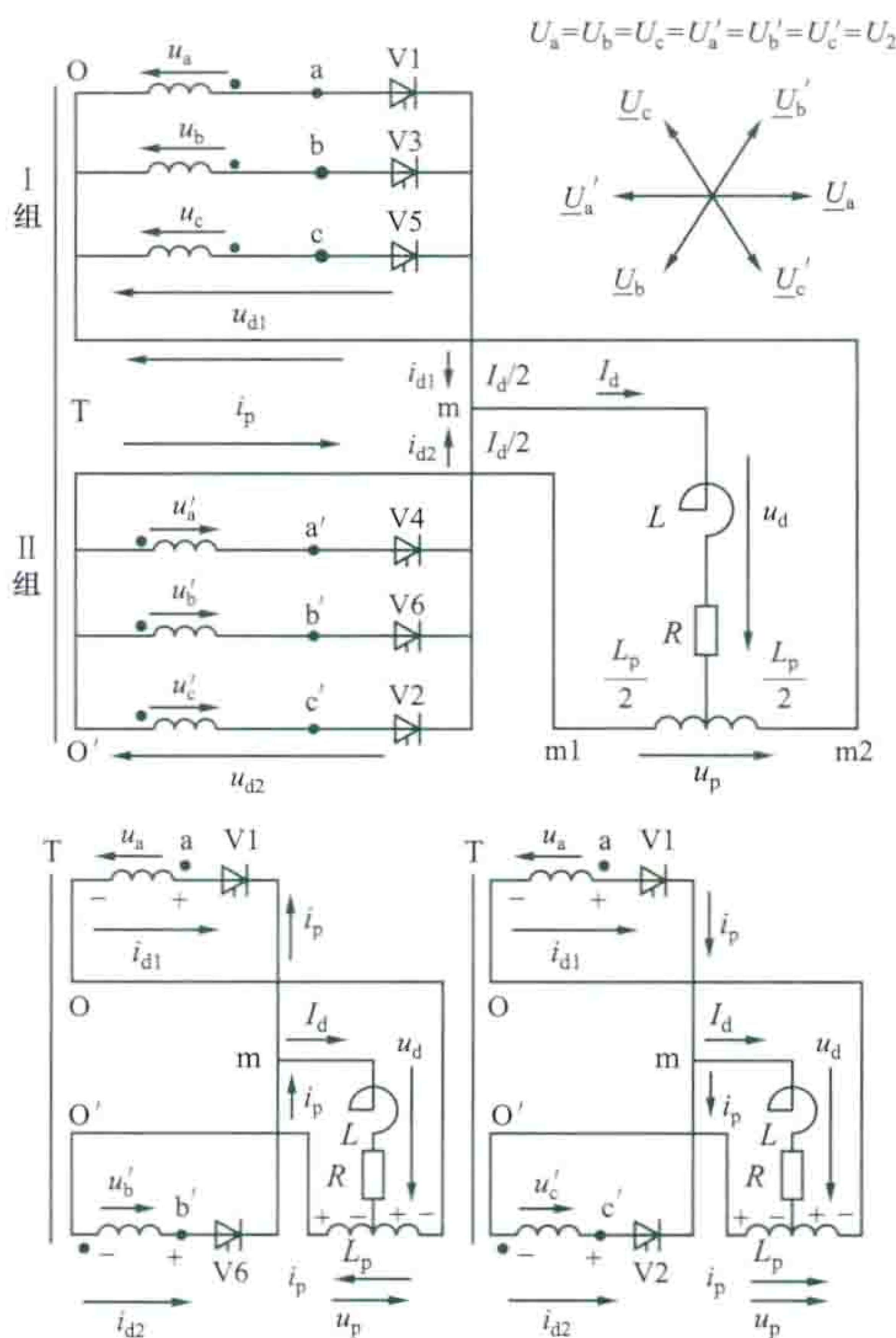


图3 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路

（1）输出直流电压 u_d。在电源每个周期 u_d 有6次脉动。根据图3的电路得 $u_d=u_{d1}-\frac{1}{2}u_p$、$u_d=u_{d2}+\frac{1}{2}u_p$、$u_p=u_{d1}-u_{d2}$，所以 $u_d=\frac{u_{d1}+u_{d2}}{2}$，即在任一时刻，$u_d$ 值等于导通的两相电压之和的一半（如 $\frac{u_b'+u_a}{2}$，$\frac{u_a+u'_c}{2}$，$\frac{u_c'+u_b}{2}$，⋯）。

（2）均衡电压 u_p。$u_p=u_{d1}-u_{d2}$，即等于导通两相电压之差。求 $\alpha=0°$ 时 u_p 的表达式，需求出 u_{d1}、u_{d2} 在 $\alpha=0°$ 时的表达式，即

$$u_{d1}=\frac{3\sqrt{3}\times\sqrt{2}U_2}{\pi}\left(\frac{1}{2}+\frac{1}{8}\cos3\omega t-\frac{1}{35}\cos6\omega t+\frac{1}{80}\cos9\omega t+\cdots\right)$$

$$u_{d2}=\frac{3\sqrt{3}\times\sqrt{2}U_2}{\pi}\left[\frac{1}{2}+\frac{1}{8}\cos3(\omega t-60°)-\frac{1}{35}\cos6(\omega t-60°)+\frac{1}{80}\cos9(\omega t-60°)+\cdots\right]$$
$$=\frac{3\sqrt{3}\times\sqrt{2}U_2}{\pi}\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{8}\cos3\omega t-\frac{1}{35}\cos6\omega-\frac{1}{80}\cos9\omega t+\cdots\right)$$

得

$$u_p=u_{d1}-u_{d2}=\frac{3\sqrt{3}\times\sqrt{2}U_2}{\pi}\times\left(\frac{1}{4}\cos3\omega t+\frac{1}{40}\cos9\omega t+\cdots\right)$$

即 u_p 是3倍于电源频率的近似三角波。

（3）环流 i_p。i_p 的大小由 u_p 与平衡电抗器电抗 X_p 决

定。若忽略 u_p 的高次谐波和平衡电抗器的电阻值，可近似认为环流 i_p 是落后于 u_p90°的 3 倍电源频率的正弦波。

(4) 直流平均电压 U_d。每隔 π/3 换相一次，按 π/3 积分求取 U_d。以两相电压 u_a 与 u'_c（1、2 管）导通为例，则有

$$u_a=\sqrt{2}U_2\sin\omega t$$

$$u'_c=\sqrt{2}U_2\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{3}\right)$$

$$u_d=\frac{u_a+u'_c}{2}=\frac{1}{2}\left[\sqrt{2}U_2\sin\omega t+\sqrt{2}U_2\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{3}\right)\right]=\frac{\sqrt{3}\times\sqrt{2}U_2}{2}\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right)$$

得 $$U_d=\frac{1}{\frac{\pi}{3}}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha+\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+\frac{\pi}{3}+\frac{\pi}{3}}\frac{\sqrt{3}\times\sqrt{2}U_2}{2}\times\sin\left(\omega t-\frac{\pi}{6}\right)\mathrm{d}\omega t=\frac{3\sqrt{6}U_2}{2\pi}\cos\alpha=1.17U_2\cos\alpha$$

整流电压波形与三相桥式可控整流电路相似。$\alpha=0°$时，$U_d=0$。

(5) 直流平均电流 I_d。$I_d=U_d/R=1.17U_2\cos\alpha/R$，各绕组及晶闸管只流过 $I_d/2$，故本电路特别适于用作低电压、大功率的电解电源。

12 相整流电路 广泛用于大功率电解电源，以减轻对电网的干扰，使整流后的输出电压 u_d 波形尽可能平滑。12 相整流电路又可分为桥式并联、桥式串联、带 $3f$ 和 $6f$ 平衡电抗器的双反星形等 3 种。另外，用两组桥式逆并联整流电路也可组成 12 相整流电路。

桥式并联 12 相整流电路　整流变压器二次侧两绕组分别为星形和三角形连接，对应线电压彼此相位相差 $\frac{\pi}{6}$，使三角形连接的各组电压有效值大于星形连接的各相电压有效值$\sqrt{3}$倍，则两者线电压有效值相等。两绕组各供给一个三相桥式整流电路，两者直流输出端共接一个平衡电抗器 L_p，经中心抽头并联向负荷供电，如图 4 所示。

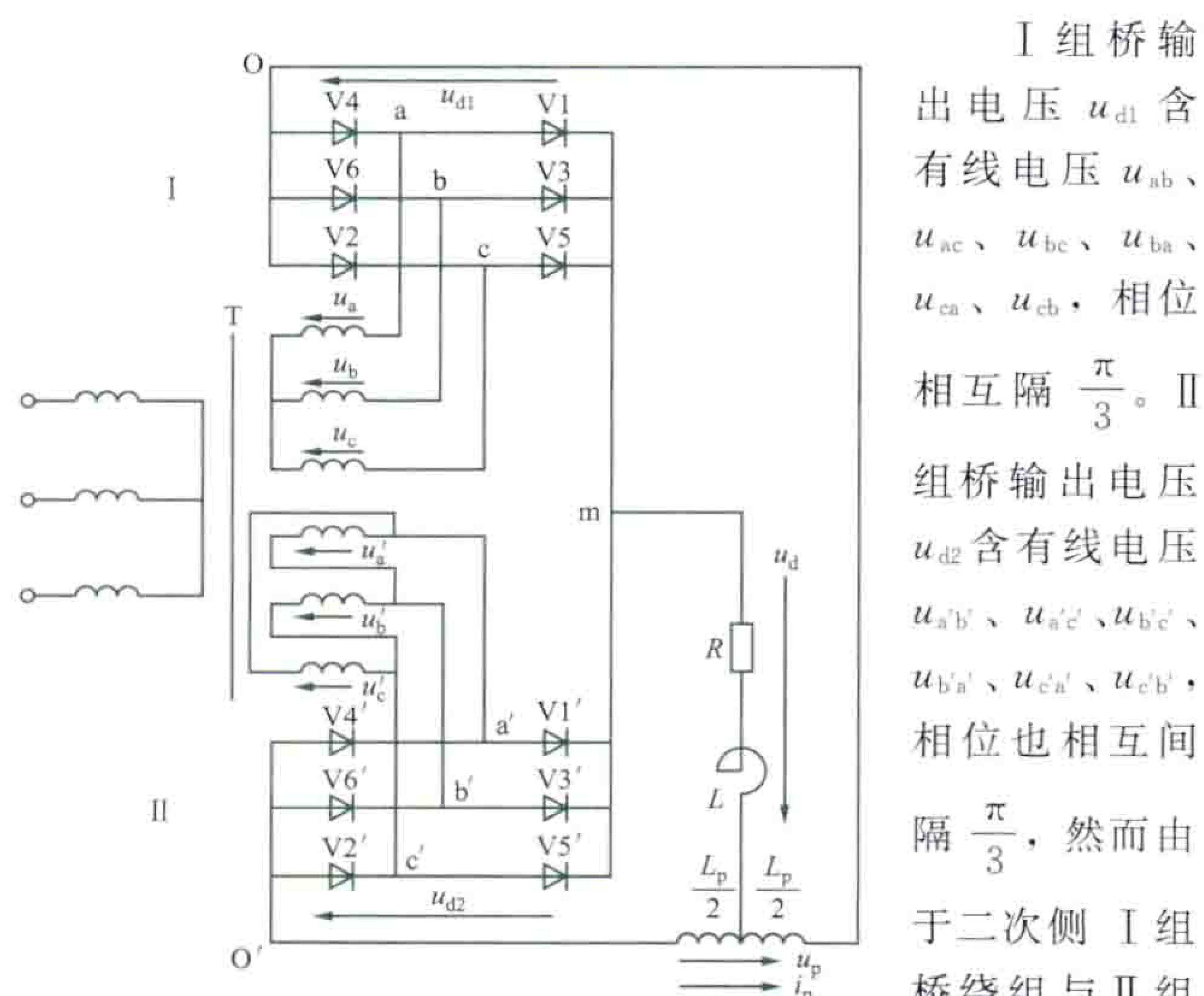


图 4　桥式并联 12 相整流电路

Ⅰ组桥输出电压 u_{d1} 含有线电压 u_{ab}、u_{ac}、u_{bc}、u_{ba}、u_{ca}、u_{cb}，相位相互隔 $\frac{\pi}{3}$。Ⅱ组桥输出电压 u_{d2} 含有线电压 $u_{a'b'}$、$u_{a'c'}$、$u_{b'c'}$、$u_{b'a'}$、$u_{c'a'}$、$u_{c'b'}$，相位也相互间隔 $\frac{\pi}{3}$，然而由于二次侧Ⅰ组桥绕组与Ⅱ组桥绕组的连接方式不同，使得 u_{ab} 超前 $u_{a'b'}$ $\frac{\pi}{6}$，其余对应线电压类推。

输出直流电压 $u_d=\frac{u_{d1}+u_{d2}}{2}$ 的原理与带平衡电抗器的双反星形整流电路相同，在每个电源周期内，u_d 有 12 次脉动。输出电压平均值与三相桥式整流电路 $\alpha=0°$时相同，即 $U_d=2.34U_2$。

平衡电抗器的均衡电压 $u_p=u_{d1}-u_{d2}$，是 6 倍于电源频率的三角波。环流 i_p 是平衡电抗器的励磁电流，实际此值较小，可视为纯电感电流，也是 6 倍于电源的频率。

桥式串联 12 相整流电路　整流变压器二次侧两绕组分别为星形和三角形连接，同样，也各供给一个三相桥式整流电路，如图 5 所示。

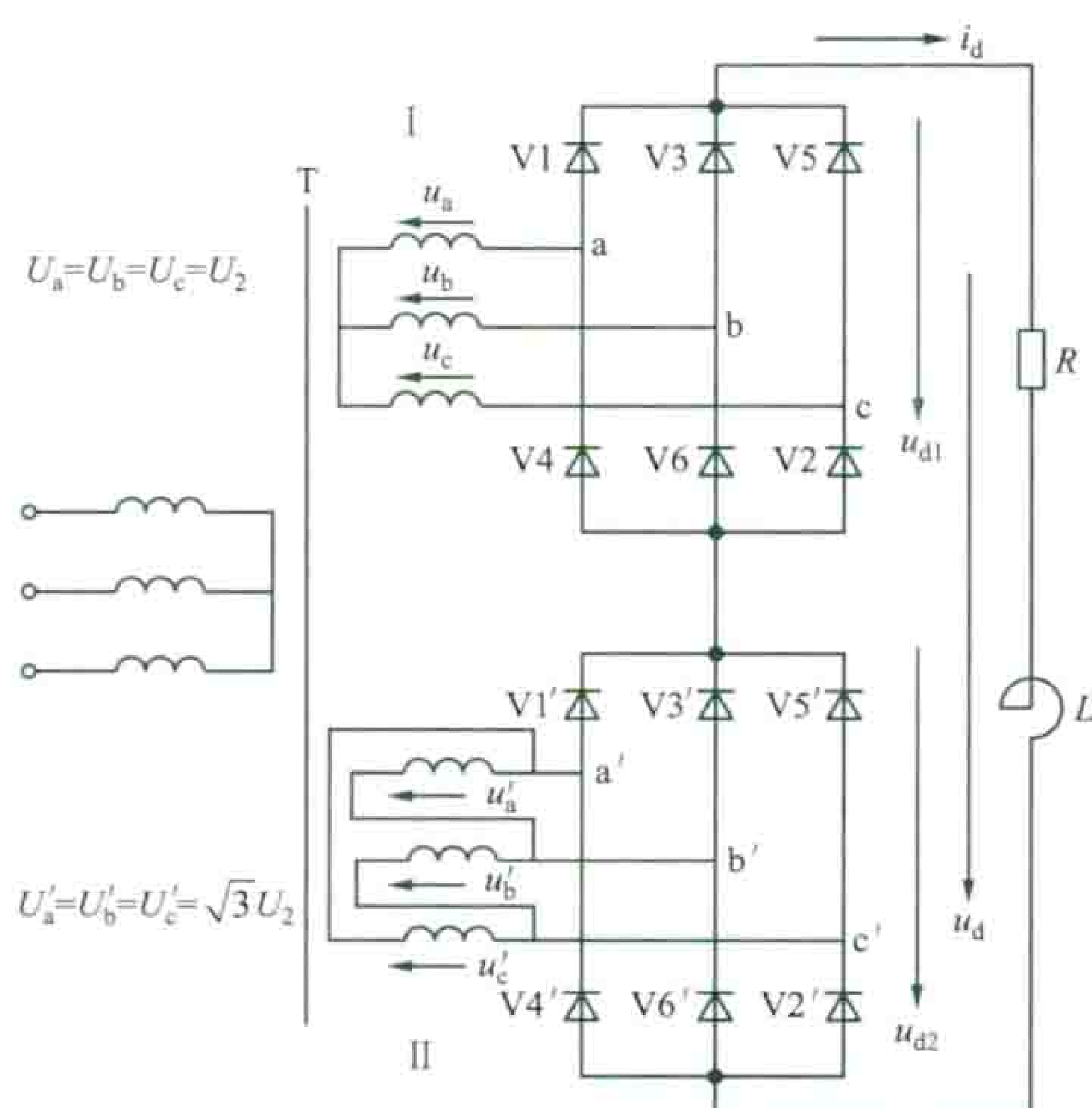


图 5　桥式串联 12 相整流电路

Ⅰ组桥有线电压 u_{ab}、u_{ac}、u_{bc}、u_{ba}、u_{ca}、u_{cb}，其输出电压 u_{d1} 由这些电压组成。Ⅱ组桥有线电压 $u_{a'b'}$、$u_{a'c'}$、$u_{b'c'}$、$u_{b'a'}$、$u_{c'a'}$、$u_{c'b'}$，其输出电压 u_{d2} 由这些电压组成。两桥串联后输出直流电压 $u_d=u_{d1}+u_{d2}$，在电源一个周期内 u_d 有 12 次脉动，适于用作高电压电解电源。

两个桥各自独立地按顺序换相，互不干扰，任何瞬间每个桥都有两个整流管导通，两个桥共有 4 个整流管同时导通，每个整流管在 $\frac{2\pi}{3}$ 期间所流过的电流皆为负荷电流 i_d。

带 $3f$ 和 $6f$ 平衡电抗器的双反星形 12 相整流电路　对于低电压、大功率的电解电源，常采用这种接线方式，如图 6 所示。两台整流变压器一次侧绕组分别接成星形和三角

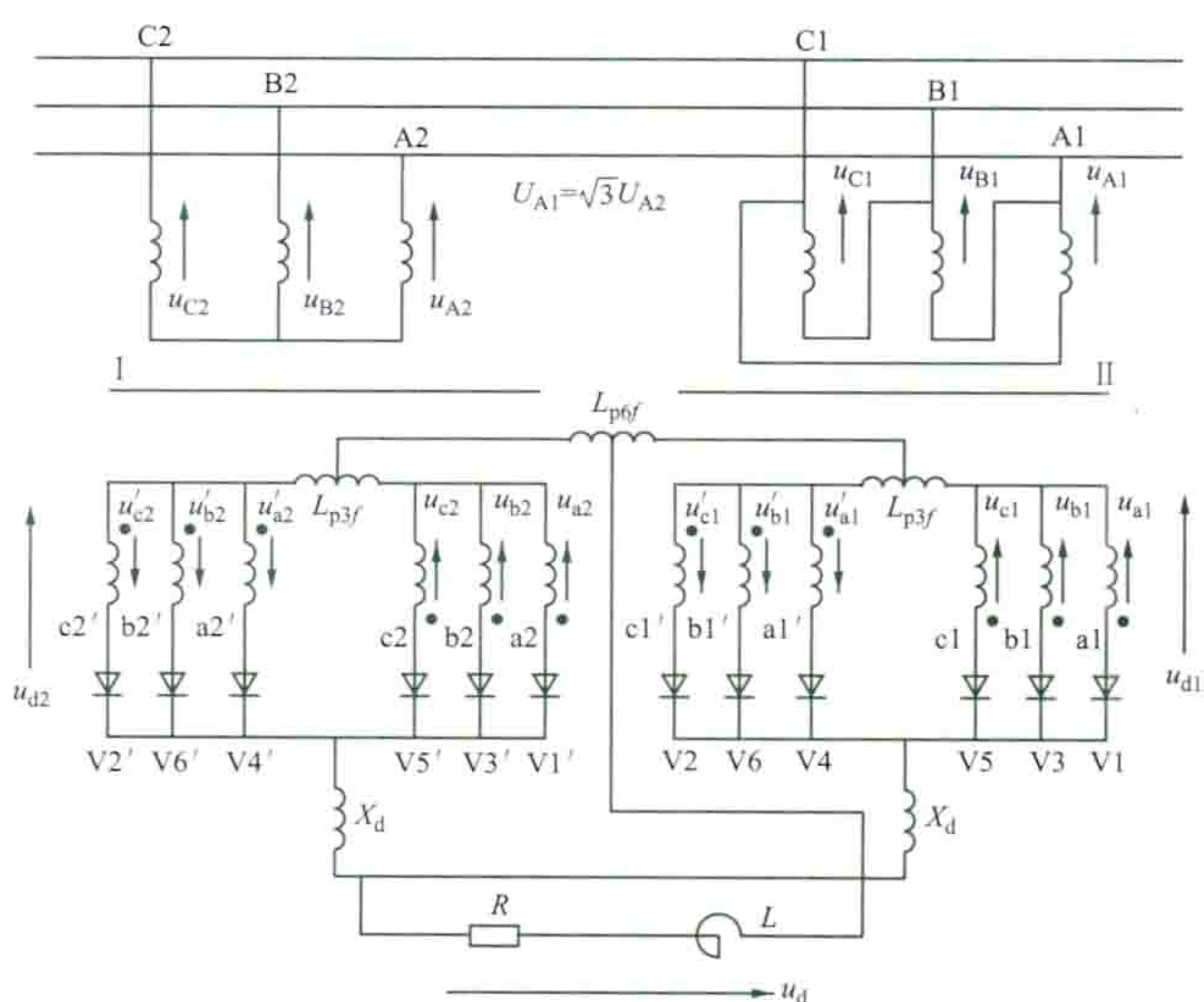


图 6　带 $3f$ 和 $6f$ 平衡电抗器的双反星形 12 相整流电路

形，主要是使二次侧绕组对应的相电压彼此移相$\frac{\pi}{6}$。

对于二次侧两组双反星形整流电路，其输出直流电压u_{d1}和u_{d2}在电源一个周期内各有6次脉动，故采用3倍于电源频率的平衡电抗器L_{p3f}。上述两组整流电路再并联，成为12相整流，所以采用6倍于电源频率的平衡电抗器L_{p6f}来承受均衡电压u_p。

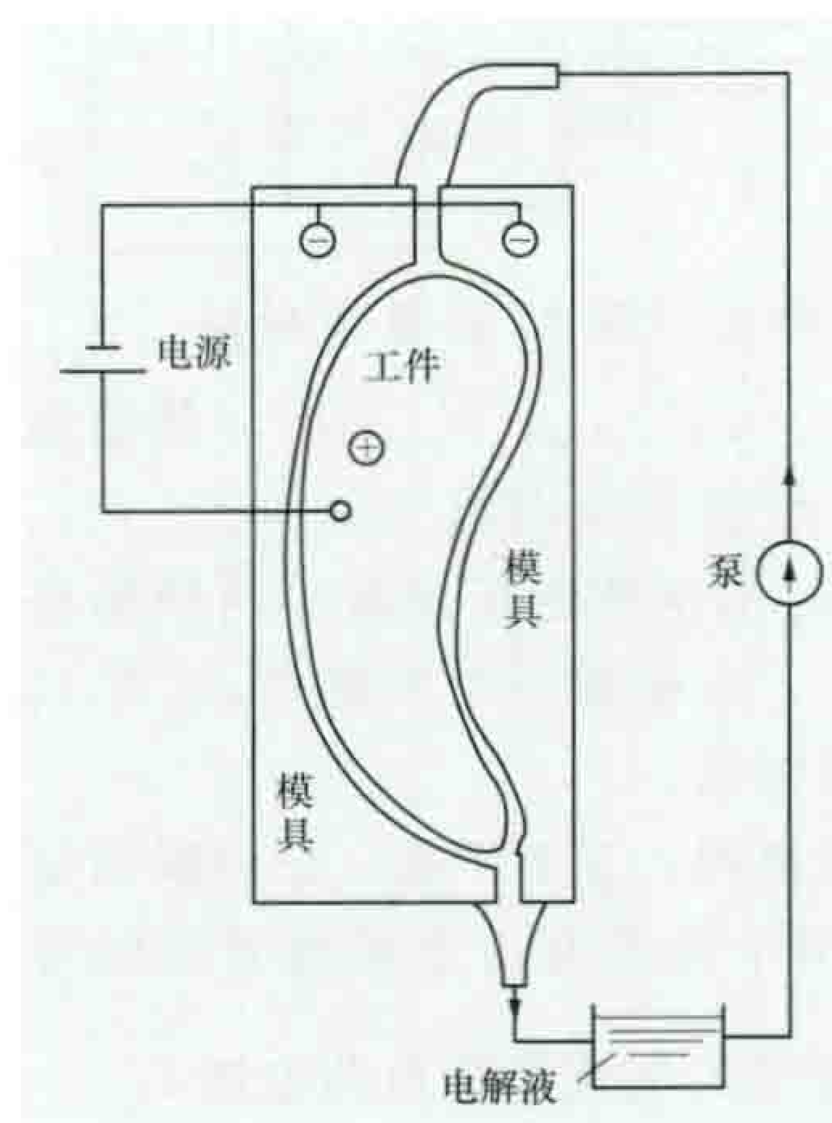
输出电压u_d的波形与桥式并联12相整流电路相同。

在电解工业中，大功率电源还广泛采用以上述整流电路为基础组成的18、24、36、48相等多相整流电路，以达到电解所要求的技术和经济指标。

dianjie jiagong

电解加工 （electrolytic machining） 利用电解原理使金属工件电溶解，进行形状及尺寸加工的技术。电解加工适用于制造较难加工的硬、韧材料，如钛、耐热合金钢、不锈钢、硬质合金钢等的零件，形状复杂的型面和型腔，如叶片、锻模、膛线、方孔、刻印版、去毛刺等。

电解加工的原理示意见图。以被加工金属工件为阳极，以按所需形状、尺寸制作的金属工具模为阴极，以被加工件金属盐的水溶液为电解液，通直流电进行电解。阳极固定不动，移动阴极，在两极之间始终保持一狭小的距离，使电解液（工作液）以高速度在两极间狭小的间隙中流过，冲刷掉工件上因电溶解形成的腐蚀层，获得与工具模型形状和尺寸一致的成品工件。大电流电解和电解液高速循环是电解加工的特点。电解加工的优点是加工速度快，能一次加工出复杂的型孔、型面、型腔，加工面的光洁程度高，不会在加工件上产生热变形和裂纹，且几乎没有工具磨损问题；但也有缺点及局限性，如加工精度较低，工艺不够稳定，设备较为庞杂，投资较高，因此只有在特殊情况下采用。



电解加工原理示意图

电解加工的反应过程比较复杂，其电解液成分、工艺参数随工件材质不同而有很大变化。一般电解工作电压为6～24V，电流密度为10～500A/cm²，加工间隙为0.05～1.0mm，电解液流速为5～50m/s。

dianjie zhengliusuo

电解整流所 （rectifier station for electrolysis） 安装整流器及其辅助设施，供给电解所需直流电源的场所。小型电解所需的直流电源功率不大，往往在电解槽附近，或间隔开的房间内，安装成套的整流器即能满足电解生产的需要。大、中型电解所需的直流电源功率从数千千瓦至数百兆瓦不等，需要设置专门的整流所来供应。整流所多由高、低压变配电设备、整流器、直流开关设备及其他辅助设备组成。在以电解直流负荷为主的企业中，常常把企业的总降压变电所和整流所设置在一起，既提供电解用直流电源，又是企业的交流电力配电中心。

电解整流所涉及的主要问题有：选定电源，电压选择与电压调节，确定交、直流供电系统接线，选择整流器，谐波抑制和功率因数补偿，直流母线的选择，整流所的监控以及整流所的位置和配置等。由于常温超导材料技术的发展，超导材料在电解直流电源中的运用正引起人们的关注。

选定电源 一般的电解整流所负荷不大，对供电可靠性的要求不高，事故停电只影响产量，不会构成对生产设备的破坏，不会产生安全问题。但铝电解、镁电解整流所停电时间过长将导致电解槽的破坏，需要长时间停产大修，给生产和经济造成重大损失；锌电解整流所停电之后，将造成电解槽内电锌返溶，产生氢气，若遇火花将引起爆炸。因此，铝电解、镁电解整流所及其他大、中型电解整流所要求有两个电源供电，任一电源应能满足全部用电负荷的需要。小型整流所可由一个电源供电。为锌电解设置应急电源时，其容量按15%～20%正常负荷考虑。

电压选择与电压调节 包括交流侧电压选择、直流电压选择与电压调节。

交流侧电压选择 为减少变压器重复容量、提高效率、减少投资，应以企业的受电电压为整流变压器的一次侧电压。按中国电压标准，现行电压为0.38，6，10，35（66），110，220，330，500kV。但当受电电压很高，如220kV及以上时，应对采用直接降压还是采用两次降压做仔细的技术经济比较。当整流所建设在发电厂或企业自备电厂附近时，宜采用发电机电压直配方式供电，以减少大量的升、降压变配电设备，节省投资，减少电能损失。

在确定整流器一次交流受电电压时，还应考虑到电解厂的发展扩建问题。

直流电压选择与电压调节 直流电压选择和直流电压的调节范围都是根据生产工艺要求确定的。电解直流电压低的为数伏，高的可达到1600V，调压范围有的要求为0～100%。调压的方式和手段也比较多。以二极管为整流元件的硅整流装置，小型整流所调压，采用感应调压器或移圈调压器；大中型整流所调压，采用有载调压变压器和饱和电抗器，前者为粗调，后者为细调。以晶闸管为整流元件的硅整流装置，小型整流所可用晶闸管相控调压，大中型整流所采用晶闸管相控调压并配以无载或有载调压变压器调压。由于各种电解槽在正常生产条件下的电流-电压特性都不一样，企业分期投产时也有特殊的调压要求，因此，需要在整流变压器第三绕组或中间绕组改接抽头以解决大范围分段调压问题。

由于大功率晶闸管制造技术的进步，触发技术的发展，使得硅整流器的直流调压方式取得了很大发展。电解用单台硅整流器，无论在容量上还是在调压性能上，都基本上能满足要求。

降压和调压的技术方案不同，可能导致设备结构及其复杂程度不同，使设备的造价差异很大，在运行、维护的可靠性和方便程度上也不一样。这是需要深入研究的重要问题之一。

确定交、直流供电系统接线 一般中、小型电解整流所的整流器容量不大或数量不多，整流变压器交流侧多采用单母线接线。但大型整流所，特别是对供电可靠性要求高、不间断供电要求严格的大型整流所，整流变压器交流侧则多采用双母线接线，当一条母线故障或检修时，由另一条母线带全部负荷运行。

由于直流正、负母线都是单母线，大型整流所有数台大型整流器并联，总电流（即电解系列电流）可达500kA，并且考虑整流器检修和轮换运行的要求，因此每一台整流器的直流侧都装有直流隔离器（最大到70kA）。

图1 年产10万t锌电解厂整流所供电系统图（部分）

图1所示为年产10万t锌电解厂整流所供电系统图（部分）。整流所内装两台大功率晶闸管整流器，单台直流输出电流为40kA，直流电压725V，交流一次侧受电电压为220kV，通过降压变压器（220/22kV）与整流变压器［22/（0.669～0.306）kV］串联供给晶闸管整流器。整流变压器的22kV绕组装有星-角无负荷转换开关，供调节直流输出电压之用，22kV还接有滤波器。整流器为三相全控桥式电路，第一台整流变压器接线移相15°，第二台移相 −15°，两台整流器同时运行构成12相整流电路。晶闸管整流器的主要特点是调压方便、效率高。

图2所示为年产铝38.8万t铝厂的供电系统图（部分），采用220kV直降式装置，电解系列电流500kA，电解系列电压最高为1250V。每个整流机组（两台整流器组成）电流96kA，变压器容量约为140MV·A。调压变压器与整流变压器为独立油箱。调压变压器采用自耦调压方式。整流变压器一次绕组为星形接线并移相，阀侧绕组的两组绕组为星形接线，另两组为三角形接线，每台整流器为同相逆并联接线，每个整流机组形成等效12脉波。调压变压器3次绕组接成三角形，用于谐波治理和无功补偿。

整流器的选择 选择整流器时应注意：①在数量上和容量上满足生产工艺的要求；②有较好的电流效率；③节约投资。另外，在大型整流所中应有备用整流器（正常带电备用），以保证生产。在大型整流所中由于采用多台整流器并联运行，整流器间电流分配有差异，所以多台整流器额定容量的代数和（不包括备用整流器）应大于电解系列电流10%左右。当然，整流器台数的选择还应尽可能使整个整流所形成较高的整流相数，以减少高次谐波对电力系统的影响。（见硅半导体整流器）

谐波抑制和功率因数补偿 电力系统对谐波和功率因数的要求都有规定，在选择大型整流器时，减少交流侧电压波形畸变是要考虑的主要问题之一。在选择和确定抑制谐波的滤波装置时，要考虑兼有补偿无功功率的功能。（见整流器谐波）

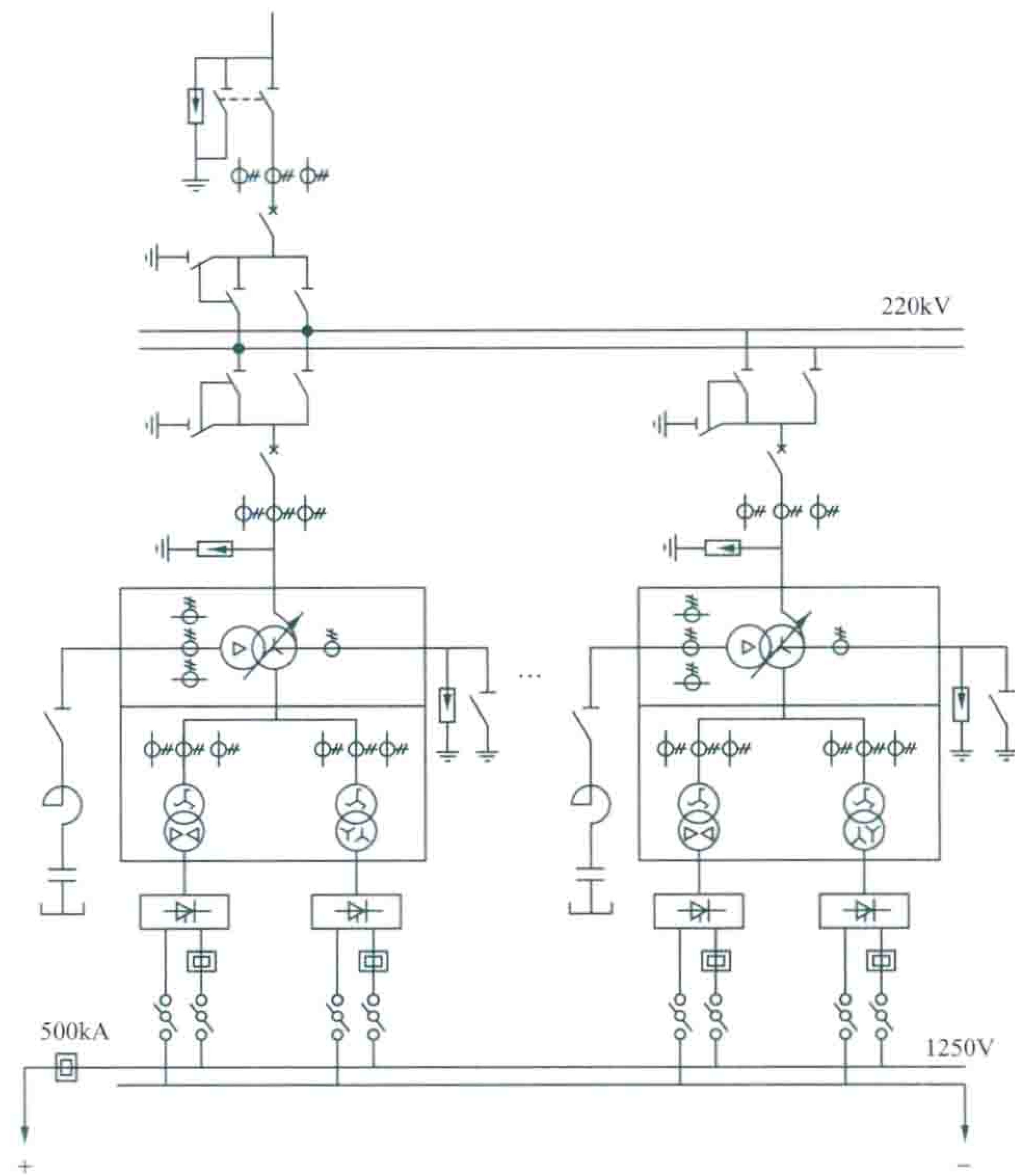


图2 年产铝38.8万t铝厂供电系统图（部分）

直流母线的选择 大型电解整流所直流母线一般采用专门生产的铝母排，中小型电解整流所直流母线可用标准规格的铜母排。对于直流汇流母线，铝电解整流所直流铝母线电流密度为0.25～0.35A/mm²，其他电解整流所直流铝母线电流密度为0.5～0.7A/mm²，铜母线为1.0～1.5A/mm²；对于整流机组的直流支母线，在满足温升条件时，铝母线电流密度为0.5～0.7A/mm²，铜母线为1.0～1.5A/mm²。

整流所的监控 计算机监控系统已在大中型整流所应用，可实现整流机组分合闸、调压、恒流及最大需量控制；可监测整流机组的运行状态，参数屏幕显示；可实现自动打印生产报表，便于电能考核和进行生产管理，以降低成本；还可以对直流系统进行绝缘监测。

整流所的位置和配置 整流所应靠近交流电源、接近直流负荷，以节约有色金属和减少电能损耗；远离污染源并在其上风向，以减少整流所的维修工作量，保证安全运行。整流所不仅在电气设备和整流器的配置上应力求合理，而且要综合考虑建筑，采暖通风，上、下水道等方面，以减少投资、缩小占地面积、方便施工、安全运行、减少电能损耗。

dianjie zhiliu dianyuan

电解直流电源

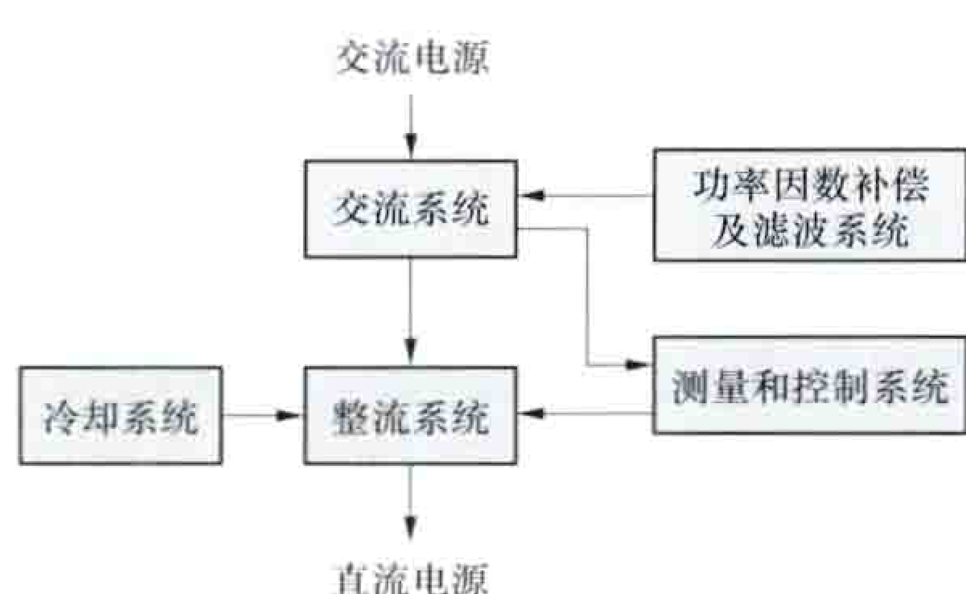
（electrolytic DC source） 在电化学工业中，为金属和非金属的电解精炼和提取、电解加工提供电能的装置。直流电源设备从最早的电池（见化学电源）发展到半导体整流器，变化极大。因工艺要求不同，直流电源电压从数伏到一千多伏，电流从数十安至数百千安，功率

从数十千瓦至数百兆瓦不等。低电压、大电流、大功率是电解直流电源的一大特点，因此也给整流设备的整流器件、整流电路、冷却系统和调压、可靠性等带来一系列问题。此外，现代硅半导体整流器是谐波发生源，大型整流器对电力系统的谐波影响更大，抑制谐波是必须注意的问题。

简史 最早的直流电源是电池，其功率小，价格昂贵，不适用于工业。1870年，直流发电机的发明大大促进了电化学工业的发展。1902年发明了玻壳汞弧整流器，1911年发展为铁壳汞弧整流器。与直流发电机组相比较，汞弧整流器单机容量大、反应速度快、效率高、体积小，因而在电解领域中很快得到推广和应用，并在一定范围内代替了直流发电机组。汞弧整流器的主要缺点是汞污染。1940年以后，机械整流技术有所发展。50年代初，瑞士和联邦德国先后制造出了供电解用的旋转式机械整流器，并立即投入了使用。机械整流器的优点是机组效率高、单机容量大，与汞弧整流器比较没有汞污染；缺点是维护复杂、检修频繁、机械噪声大、对交流电源频率变化的要求严格，因而其使用受到限制，不久即被淘汰。1956年，单结PN结锗整流管研制成功，紧接着耐温更高、内阻更小的硅整流二极管出现。1958年，美国通用电器公司PNPN结晶闸管问世。硅整流管和晶闸管同时迅速向高电压、大电流、大功率方向发展。由这些器件构成的成套硅整流器得到极为广泛的应用。

硅整流器与直流发电机、汞弧整流器及机械整流器相比较，优点是效率高、体积小、功率大、寿命长、快速响应性好、维护方便、检修工作量小、没有汞污染。20世纪90年代以来晶闸管整流技术更加成熟，已能适应在电解生产过程中采用计算机控制和管理的需要，成为理想的电解直流电源设备，基本上取代了其他整流设备。

整流装置 大、中功率电解直流电源主要由交流系统、整流系统、测量和控制系统、冷却系统、功率因数补偿和滤波系统组成，统称整流装置（见图）。交流系统包括开关设备、整流变压器等。整流系统是指整流管或/和晶闸管等器件组成的整流器。冷却系统负责冷却整流器。测量和控制系统由监测仪表和控制装置组成，主要用来测量和控制整流器的电参数。功率因数补偿和滤波系统主要由电容器、电抗器等组成，用来改善整流装置的电气性能。（见硅半导体整流器）



电解直流电源系统组成框图

整流电路 整流电路的作用是将交流电能变为直流电能。整流电路的应用十分广泛，按组成的器件可分为不可控、半控、全控3种；按电路结构可分为桥式电路和零式电路；按交流输入相数分为单相电路和多相电路；按变压器二次侧电流的方向是单向或者双向，又分为单拍电路和双拍电路。

采用不可控整流电路的硅整流器全部采用硅整流管，直流输出电压与交流输入电压保持固定的比例关系，调节输入的交流电压可实现直流电压的调节。采用全控整流电路的硅整流器全部采用晶闸管，调整晶闸管触发的延迟角 α，可控制直流电压的大小和极性。采用半控整流电路的硅整流器中晶闸管与硅整流管各占一半，其整流特性与采用全控整流电路的基本相似，主要区别是不能逆变。（见电解电源整流电路）

谐波 硅整流器接入电力系统后，由于采用整流器件换流和晶闸管控制等因素，导致向电力系统"注入"谐波电流。谐波电流与电力系统阻抗构成谐波电压降，造成电力系统电压正弦波形畸变。如果畸变率超过一定限值，将威胁电力系统和用户电气设备的安全运行。为此，在设计电解直流电源时，必须采取措施解决或降低波形畸变率。（见整流器谐波）

参考书目

王兆安，刘进军．电力电子技术．5版．北京：机械工业出版社，2009.

dianjiezhi

电解质 (electrolyte) 本身具有离子导电性或在一定条件下（如高温熔融或溶于溶剂形成溶液）能够呈现离子导电性的物质。根据其电离度的大小，可分为强电解质和弱电解质。最常见的电解质为酸、碱、盐的水溶液，称为水溶液电解质。有些盐类物质，在熔融状态也具有电解质的性质，例如，生产金属钠用的纯氯化钠熔体和电解铝生产中的冰晶石-氧化铝熔体，称为熔盐电解质。还有一些盐类物质，即使在固态时也是电解质，如碘化银，称为固体电解质。

dianlan fanghuo

电缆防火 (cable fire protection) 防止电缆线路由于外部失火或内部故障而起火引燃电缆和防止电缆起火后火势蔓延的措施。电力电缆的绝缘层和护层，含有大量碳氢化合物材料，氧指数（指将一定数量的试样，放在特制的容器中，由完全充满氮气状态开始，用规定的点火方式，逐步调节输入氧气的含量，使刚能将容器内试样平稳燃烧时的氧气浓度）大都在19或以下，一般在300～400℃即能引燃，一旦着火不能自息而延燃。电缆防火常从四个方面着手使电缆处于良好的运行环境中；用阻燃材料作电缆绝缘或护层，采取隔断火苗的措施，限制火灾范围，采取报警和灭火装置及时扑灭火灾。

阻燃材料 用阻燃材料作电缆绝缘或护层，如耐火电缆、阻燃电缆。

耐火电缆 在火焰高温作用下，在一定时间内仍能维持通电能力的一种电力电缆。耐火温度一般为750～1000℃，时间为1.5～3h，在中国，按耐火特性分为四级。耐火电缆适用于火灾中要求保证供电的公用重要低压回路，如消防水泵动力电源回路或感温、感烟、水喷雾灭火示警回路等。耐火电缆分为外层耐火电缆、内层耐火电缆、绝缘耐火电缆3种。①外层耐火电缆，用玻璃纤维带加防火涂料或膨胀型耐火包带等包在常规电缆的外面再加一层保护带的耐火电缆；②内层耐火电缆，用云母玻璃丝带绕包在导体上的一种耐火电缆；③绝缘耐火电缆，用无机矿物（氧化镁）或硅橡胶作为电缆绝缘的耐火电缆。耐火电缆因制造工艺复杂、造价高等原因，主要用于1kV及以下。

阻燃电缆 又称难燃电缆，在电缆护层火焰燃烧后仅延燃有限距离而能自熄的一种电力电缆。常用在易受外部影响着火的电缆密集场所或可能因着火延燃酿成严重事故的电缆通道内，如电缆隧道、电缆层等。阻燃电缆在结构上与一般

电缆没有多大区别，主要是在电缆护层材料中加入阻燃剂或采用难燃材料。在中国，阻燃电缆按阻燃级别分为四级，每级按阻燃试样类别分为 A、B、C 三类。符合单根电缆燃烧试验的电缆未必能通过多根电缆垂直燃烧，多根电缆敷设的阻燃电缆应通过成束电缆燃烧试验。常用的聚氯乙烯阻燃电缆燃烧时，会产生 HCl、CO 等有毒有害气体，危及人身安全和腐蚀电气设备，弥漫的浓烟会阻碍人员避难和消防救援工作，因此在某些重要的变电站、发电厂和核电厂内要求使用低烟无卤阻燃电缆。

隔断火苗 将普通电缆外护层和周围空气相隔离的措施，如将电缆直接埋设在地下，也有用装设防火槽、绕包防火带或涂刷防火涂料等较为灵活的方式。这种措施主要用于非阻燃和非耐火电缆。

埋沙敷设 电缆敷设在黄沙中。具有最佳的防火效果，但载流量要降低 30%左右，又不利于电缆的运行管理，这种方式主要应用在高压充油电缆线路上。

防火槽 设置在电缆周围的封闭式槽盒（见图 1）。使用耐火或难燃材料构成槽盒，如玻璃钢、金属、混凝土等。槽盒内垫隔热垫块或垫板，槽盒两端及接口处用耐火材料堵严，并保证盖上盖后形成阻火段，即使槽盒内电缆着火，槽内空气有限，也不易延燃。



图 1 电缆防火槽盒

防火带 用氧指数较高的阻燃材料制成的绕包在电缆护层上的带子（见图 2）。通常用于电缆线路转弯处或重点防火区段。它的优点是操作比较简便，绕包厚度便于调整。



图 2 电缆防火包带

防火涂料 用特殊配制的阻燃材料喷涂或漆刷在电缆护层上的涂料。防火涂料有膨胀发泡型和非膨胀发泡型两种。膨胀发泡型涂料的优点是在火焰高温下，涂层的厚度可以膨胀很多倍，因此起到良好的隔热作用，而在常温时厚度仅为 0.6～1mm，不影响电缆的散热性能，从而不降低电缆的输送容量。膨胀发泡型涂料有取代非膨胀发泡型涂料的趋势。

限制火灾范围 将已经发生的火灾限制在一定区段内的措施，如采用耐火隔板、增设防火墙、填补电缆穿越楼板孔洞的封堵泥。

耐火隔板 用难燃性材料制成的防止电缆延燃的板材。可应用于封堵电缆贯穿孔洞、多层电缆层间分隔。耐火隔板可按照性能需要选取，并按现场尺寸加工定制。

防火墙 在通畅的电缆廊道中设置的带防火门的夹墙，使廊道隔离成几个区段，缩小燃烧范围。防火门关闭不利于廊道的通风，影响电缆载流量。普遍采用火灾探测器与防火门联动系统，在正常情况下，防火门不关闭以保持通风，当发生火灾时，由火灾探测器报警，联动关闭发生火灾的防火分区的防火门，使火灾控制在一个防火分区内。

封堵泥 用以封堵电缆穿越楼板或夹墙孔洞周围空隙的填充物。有用软性耐火纤维填充，表面刷以砂浆水泥；有用腻子型（油泥状）防火堵料填充；也有先用软性耐火纤维填充，再用封堵泥塞平。玻璃纤维、石棉、矿渣棉等都属软性耐火纤维材料。腻子型封堵泥的特点是常温时始终柔软并有黏附力，在火焰高温时呈硬化状态。

报警和灭火装置 采用报警和灭火装置及时扑灭火灾，如报警消防系统、电缆温度监测系统等。

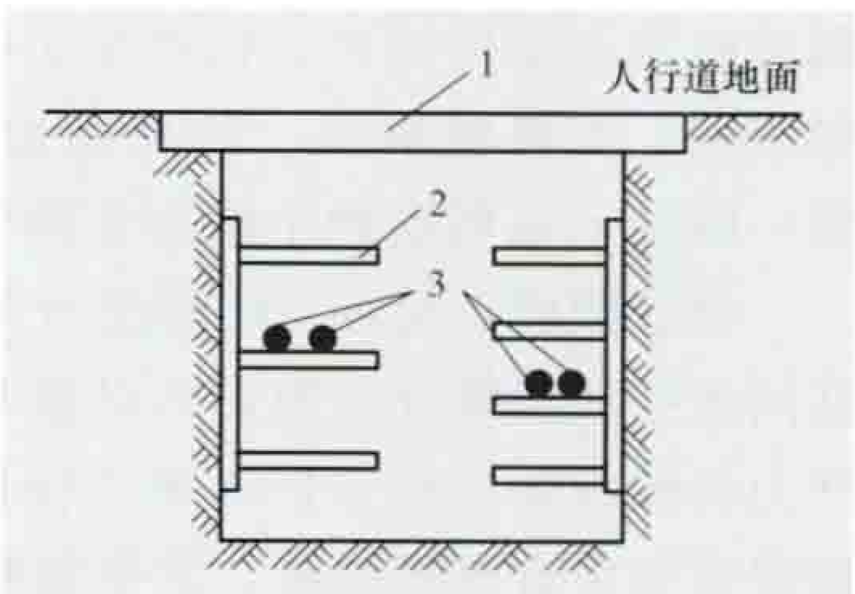
报警消防系统 发生火灾前监视烟雾或温度并报警、发生火灾后可自动扑灭火焰的装置。它既可以联动操作，也可以部分手动操作。报警系统常用的有烟雾传感报警系统、局部温差传感报警系统。消防系统是在电缆失火后能喷射水雾或起动四氯化碳、泡沫灭火机的装置。从消防经验来看，水喷雾装置灭火效果最好，因此采用较多，但要保证水柱压力和动力源的可靠性。

电缆温度监测系统 安装分布式光纤测温系统（DTS）监测电缆表面温度，发生火灾时报警或通过联动起动消防系统自动扑灭火焰的设备。电缆温度监测系统安装简便，主要包括沿电缆敷设的光纤和安装在线路两端的主机，分布式光纤既是传感器又能作为传导信号的介质，主机由工业计算机、光器件、激光源等部分组成，被集成在机箱内，用于整个系统的参数配置、信号采集、信号分析和分析结果输出等。电缆温度监测系统与通信网络连通后能实时传输温度检测信号，在温度发生异常升高时报警通知运行值班人员，也可与消防系统联动起动后自动扑灭火焰。电缆温度检测系统推荐在电缆隧道中使用。

dianlangou fushe

电缆沟敷设 （cable trench laying） 将电缆敷设在预先制成的电缆沟中的一种电缆安装方式。适用于地面载重负荷较轻的电缆线路路径，如人行道、工厂内的场地等。

电缆沟一般采用混凝土或砖砌结构，其顶部用盖板覆盖。电缆沟有齿口，盖板长度与齿口相吻合，不宜有过大间隙。盖板顶面和地面齐平，便于开启，也防止盖板与地面高低不平和雨水进入电缆沟。根据所敷设电缆的数量不同，可以将电缆单层搁置在电缆沟底，也可以将电缆分层搁置在电缆沟的支架上，大部分使用后一种形式。分层搁置的电缆留有纵向及横向间距。电缆支架可根据敷设电缆的数量装在电缆沟的单侧或两侧。两侧支架之间或支架与电缆沟侧壁（单侧支架）之间留有一定宽度的通道，如图所示。有的电缆沟内，为了防火还填有黄沙。



电缆沟结构示意图

1—盖板；2—支架；3—电缆

电缆沟敷设的优点类似于电缆排管敷设，且不需要人井，减少了投资。缺点是盖板承压强度较差，不能使用在车行道上，且电缆沟离地面太近，降低了电缆线路的载流量。

电缆沟敷设早先用在发电厂及变电站内。英国曾利用街道电缆沟的电缆热量，融化人行道上的积雪。20 世纪 70 年代，中国也开始少量使用人行道电缆沟，并且在发电厂内及变电站周围建造一定深度的电缆沟，便于电缆进出线路的敷设施工。

dianlan paiguan fushe

电缆排管敷设 (cable duct laying) 将电缆敷设在预先埋设于地下的管子中的一种电缆安装方式。通常用于交通频繁、城市地下走廊较为拥挤的地段。将电缆线路的路径开挖至设计的深度和宽度后，先在沟底浇注混凝土基础，再将分层组合的塑料管或石棉水泥管放在基础上，而后用混凝土填满管间的孔隙，待混凝土坚硬后恢复路面，如图 1 所示。排管每达到一定长度后，设置一座人井，两座人井间的距离取决于敷设电缆时的允许牵引长度和地形。

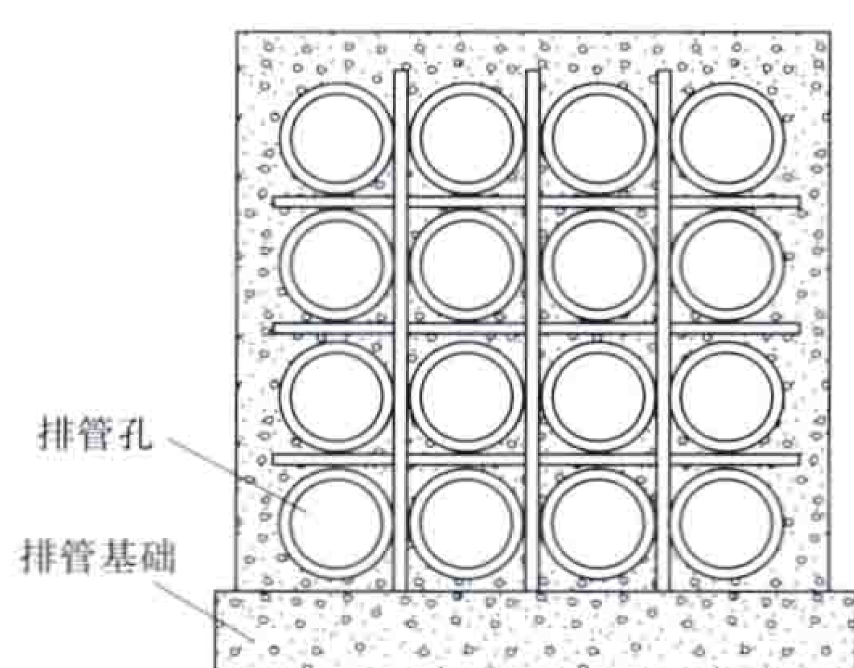


图 1 电缆排管示意图

人井为牵引电缆（见图 2）进入排管的施工场所，兼作电缆接头放置和安装场所。人井由于受到上面道路车辆的荷重和冲击，采用钢筋混凝土浇注制成。人井的出入孔由于使用频繁，常用铸铁做成盖和座，也采用再生塑料制成井盖。人井顶端设置两个出入孔，以便施工时作为进出风口，使井内空气流通。



图 2 牵引电缆排管敷设

电力电缆线路用排管敷设受到机械损坏的可能性减小，因此电缆不需要铠装，但在牵引电缆时由于金属套与排管内壁摩擦，容易被损坏，故在制造时通常增加了金属套的厚度，国际上还将这种电缆称作排管电缆。

排管敷设（见图 3）的优点是土建工程一次完成，其后在同途径陆续敷设电缆，不必重复开挖道路，此外不易受到外力机械损坏。缺点是土建工程投资较大，工期较长，而且如果排管中有电缆故障，需要更换两相邻人井间的整根电缆。

20 世纪 20 年代，日本、美国相继采用排管敷设电缆线路。中国从 30 年代也开始采用排管敷设，由于排管土建工期较长，70 年代后逐步发展了预制式的排管和人井。有的排管采用高强度塑料管，省却了混凝土浇注工序。有的人井用混凝土预制件现场组装构成。



图 3 电缆排管

dianlan suidao fushe

电缆隧道敷设 (cable tunnel laying) 将电缆敷设在地下隧道内的一种电缆安装方式。电缆隧道中的超高压电力电缆如图 1 所示。用于高电压、大截面、长距离的重要电缆线路敷设，以及城市中心区域电缆线路较多等不易经常开挖的场所及穿越江河、机场跑道等区域。



图 1 电缆隧道中的超高压电力电缆

为敷设电缆线路建筑的专用隧道也称电缆隧道，一般为钢筋混凝土结构，也有砖砌或钢管结构。隧道的高度、宽度除了需满足容纳需要敷设电缆的数量外，还需满足施工时必要的场地要求，因此电缆隧道净高一般不宜小于 1.9m。隧道内壁两侧装有立柱，以便安装多层支架。支架用来搁置电缆，如图 2 所示。电缆隧道通常还设有照明、排水、通风和防火措施及设备。电缆隧道敷设具有方便施工、巡视、检修和更换电缆等较多优点，其缺点是投资大，隧道施工期长，且要求严格防火。

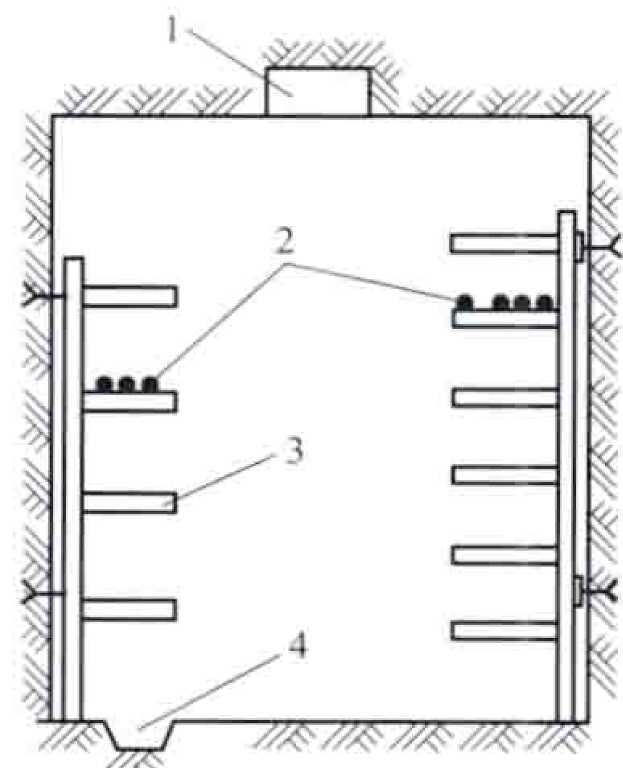


图 2 电缆隧道结构示意图

1—装灯用壁槽；2—电缆；3—支架；4—排水小沟

也有将电缆线路敷设在作交通车辆通行等其他公共综合用途

的隧道内，常将电缆架设在这类隧道的底层通风间隔中，中国已经采用这类隧道替代过江水底电缆的敷设。

敷设在隧道中的电缆，最初因为隧道深度较浅，一般电缆都能使用。由于城市建设发展，地下管道、建筑增多（如地铁、地下车库等），电缆隧道往深处发展，当使用有压力（充油）电缆时，线路上的供油系统（供油箱、压力阀、电触点压力表、真空压力表、绝缘续接、油管路和油压示警系统等附属设备装置）的布置应符合防火技术措施要求（见电缆防火）。为使充油电缆线路油压的最高压力和最低压力始终控制在允许范围内，还应在电缆线路的供油箱上安装油压示警系统，装设油压整定装置和油压示警装置。在隧道电缆工程中，从技术经济角度考虑，电力工程设计为减少事故隐患和便于施工，敷设在隧道中的电缆大都采用挤包绝缘电缆。

在较深的电缆隧道进出口都采用电缆竖井（如过江隧道、大型水电站）隧道与竖井混合路径时，一般采用电缆输送牵引方法，即履带牵引机和电动滚轮联合牵引（见电缆直埋敷设）。图3所示为电缆敷设机正在进行500kV交联电缆放线。



图3　电缆敷设机正在进行500kV交联电缆放线

dianlan zhimai fushe

电缆直埋敷设　（cable direct burial laying）　将电缆线路直接铺设在地面下土壤中的一种电缆安装方式。一般用在电缆线路不太密集和交通不太频繁的城市地下走廊，如图1所示。电缆直埋敷设不需要前期土建工程，是一种较经济的安装方式。它的优点是施工时间较短，便于维修，线路输送容量较大。缺点是容易受到机械性外力损坏，更换电缆困难，容易受周围土壤化学或电化学腐蚀。电缆直埋敷设包括与公用事业部门的协调和路径的复勘、电缆沟和接头坑开挖、电缆牵引和电缆沟回填等。



图1　电缆直埋敷设现场

与公用事业部门的协调和路径的复勘　施工之前必须与城市公用事业部门充分讨论，以便了解有关的规章制度和限制条件，并取得有关部门的同意和取得施工执照或许可证。为了探明沿电缆线路路径上有无其他管线及土质状况，需先开挖足够的样洞，并做好记录，以此作为最后确定电缆线路路径的依据。

电缆沟和接头坑开挖　电缆直埋敷设时开挖的电缆沟与其他管道通常要保持至少300mm的净距，与热力管道平行保持不小于2m的净距。电缆沟的深度取决于电缆的埋置深度。电缆的埋深由路面载重负荷及电缆的散热条件确定。埋置越深，电缆受到的路面荷重压力越小，但散热性能就越差；反之散热性能虽好，但承受压力过大，也可能损伤电缆。因此，一般规定直埋深度在人行道下为0.7m，在车行道下不小于1.0m。电缆沟要挖得比敷设在设计埋深的电缆的底部低100mm，在沟底铺软土沙层。

在安装电缆接头处，电缆沟要加宽和加深，这一段电缆沟称为接头坑。一般要求接头外部保护匣的顶部与电缆顶部达到同样的深度，在接头下部还要留有适当的净空以便于制作接头时的操作。为便于接头操作和运行时的散热，两个相邻接头之间的中心距为电缆中心距的2～4倍。电缆接头应有防机械损伤保护，每个接头装设保护盒，并列两个电缆接头位置宜相互错开。此外，对于单芯电缆两个边相的接头与接头坑壁也要留有间距。故接头坑的宽度为电缆沟宽度的2～3倍。在制作接头时，为了将接头的外壳穿在电缆上并易于套回到安装位置，在接头的一侧需要相当长度的电缆与接头保持成直线。将三相单芯电缆的三个接头并排布置是最经济的，但为了减小接头坑的宽度，有的也采用三个接头前后错开呈箭头形的布置方式。

电缆牵引　敷设电缆的牵引方法有两种：①人力牵引，在敷设长度较短质量又轻的电缆时，人力牵引仍不失为一种较为方便和有效的方法。②动力牵引，对于长而又重的电缆，需要采用动力机械牵引方法，常用的有端头牵引。当牵引的电缆更长更重，电缆路径拐弯较多，高落差变化又大时，若采用端头牵引法，电缆受到的牵引力和侧压力将会增大到超过允许值。此时要设法使牵引力不要全部集中作用在电缆端头，而使之均匀作用在电缆的全部长度上。为此，动力牵引除了端头牵引外，还有绑扎牵引、电动滚轮牵引、电缆输送牵引（履带牵引机）3种方法。

端头牵引　最常用的电缆牵引方法。将电缆盘放在电缆沟的一端，在电缆沟的另一端放置卷扬机，在电缆沟底每隔一定距离放置一个滚轮，将卷扬机上的钢丝绳沿电缆沟放在滚轮上，一直到电缆盘处与电缆端头上的牵引端相连接。当卷扬机的鼓轮卷绕钢丝绳时，电缆在滚轮上被一直牵引到电缆沟的另一端。在电缆沟拐弯处还设置有垂直滚轮，由各垂直滚轮组成的圆弧形曲率半径一般不小于电缆的最小允许弯曲半径。采用这种端头牵引法，电缆上受到的牵引力和在拐弯处受到的侧压力均不得超过电缆受力

的允许值。

绑扎牵引　如图2所示，将电缆盘放在电缆沟的一端，另一端放置卷扬机。在电缆盘的前面放置钢丝绳小车，在小车上装有一盘牵引钢丝绳，其长度至少为被牵引电缆长度的2倍，小车上还设有控制钢丝绳鼓轮转速的制动器和回收钢丝绳的动力装置。钢丝绳从小车上放出后放在电缆沟内的滚轮上通过电缆沟，然后绕在卷扬机的鼓轮上。在电缆沟拐弯处，钢丝绳经过固定在沟壁上的定滑轮后改变方向。钢丝绳就位后，将电缆端头从电缆盘上拉下，用7股麻绳先将钢丝绳扎结在电缆端头上，然后再将电缆绑扎在钢丝绳上，以后每隔2m绑扎一次，边牵引边绑扎。当电缆端头到达拐弯处遇到定滑轮之前，先将电缆从钢丝绳上解下，让钢丝绳通过定滑轮，而电缆则从定滑轮外面通过拐弯处，然后再重新把电缆绑扎在钢丝绳上继续向前牵引。如果在拐弯处作用在电缆上的侧压力较大，则要像端头牵引那样设置垂直滚轮或滑板。电缆被牵引就位后，解开绳结并将钢丝绳收回，复绕在钢丝绳小车的鼓轮上，准备牵引下一根电缆。绑扎牵引操作较烦琐，施工中很少采用。

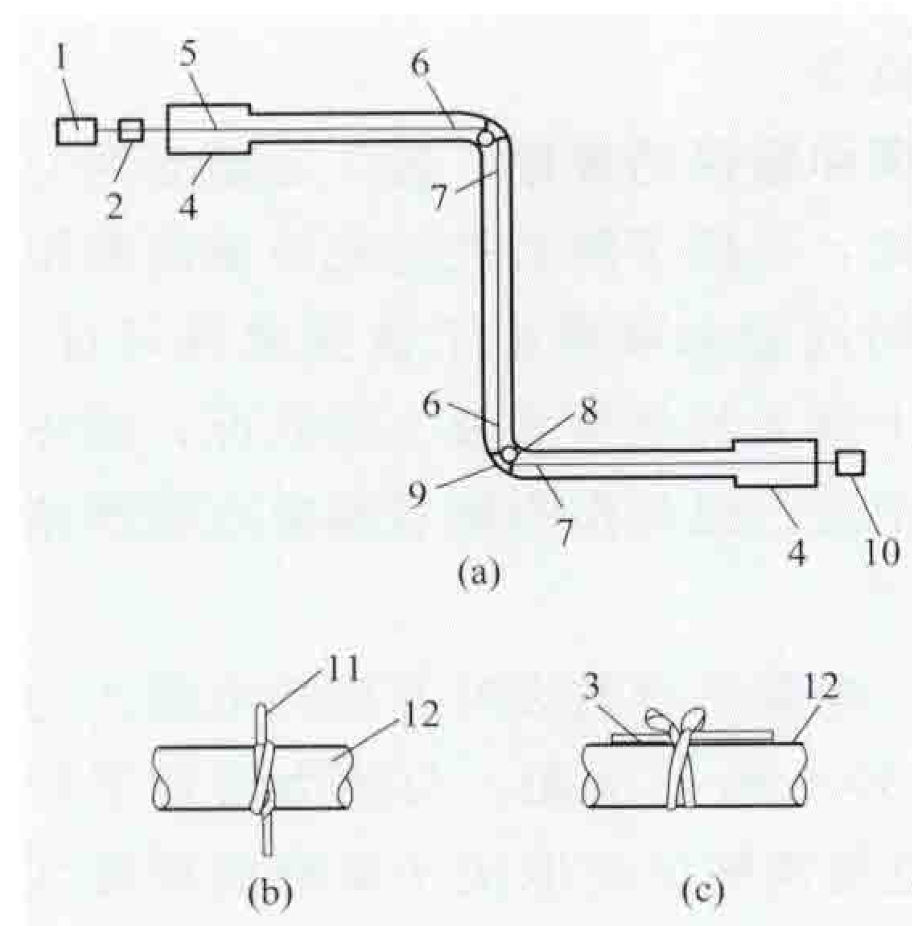


图2　电缆绑扎牵引示意图

(a) 牵引方法示意图；(b) 将7股麻绳扎结在电缆上的方法；(c) 把电缆绑扎在牵引钢丝绳上的方法

1—电缆盘；2—钢丝绳小车；3—牵引钢丝绳；4—接头坑；5—把电缆绑扎在牵引钢丝绳上；6—把电缆从牵引钢丝绳上解下；7—把电缆重新绑扎在牵引钢丝绳上；8—拐弯滚轮或滑板；9—定滑轮；10—卷扬机；11—7股麻绳；12—电缆

电动滚轮牵引　使牵引力均匀分布的一种方法。电动滚轮主要由一对转轮和导向轮等部件组成。转轮中的一个由电动机驱动。电缆在这对转轮中通过，利用电缆外护套与两个转轮之间的摩擦力获得向前推进的动力。敷设电缆时，在电缆沟的直线段内每隔10～20m放置一个电动滚轮。在电动滚轮之间，电缆由均匀放置的普通滚轮支承。在拐弯处要增加电动滚轮，以提供电缆弯曲时所需的额外动力。采用类似端头牵引的方法，引导电缆端头由一个电动滚轮推动至下一个电动滚轮。由于有电动滚轮，引导电缆运动方向所需的端头牵引力比没有电动滚轮时的小多了。电动滚轮和导向牵引卷扬机之间，通过相互连接的电气线路同步运转。

电缆输送牵引（履带牵引机）　履带牵引机又称输送机。它以电动机驱动，用凹型橡胶带夹紧电缆，并用预压弹簧调节对电缆不超过其允许的侧压力为限，使之对电缆产生一定的推力。输送机的推力一般为5、7.5kN，既可以水平又可以垂直对电缆产生推力，并且还具有对电缆的制动功能。输送机的位置及间距的设置，根据电缆截面大小、输送机推力大小、线路路径而定。输送机还可与电动滚轮、导向牵引卷扬机组合牵引，由联动控制装置操纵，大大提高了牵引力而又不会压扁电缆。

绑扎牵引、电动滚轮牵引、电缆输送牵引（履带牵引机）的选用，视具体工程而定。绑扎牵引的优点是投资少，牵引力均匀，设备维护简便，牵引速度可以调节。电动滚轮牵引的优点是便捷，平卧式电动滚轮携带方便，电源和控制线连接简便，和导向牵引卷扬机组合牵引时，由卷扬机控制同步运转，适用较长线路较重电缆的敷设牵引。电缆输送牵引（履带牵引机）的优点是能在各种敷设环境中进行电缆牵引和电缆制动，并且适应大长度、大截面、高电压电缆的敷设牵引。牵引机电缆直埋敷设现场见图3。



图3　牵引机电缆直埋敷设

电缆沟回填　全部电缆牵引就位后，在电缆壕沟内回填150mm厚软土盖没电缆，其后对电缆外护套进行电压为10kV、时间为1min的直流耐压试验，以检验外护套在电缆牵引过程中是否被损坏。试验合格后，在软土层上再覆盖一层厚约50mm的钢筋混凝土板或具有醒目警告标志的识别板，防止日后挖掘时误伤电缆。在此保护板上可用杂土回填至地面。

dianli fuhe guanli jishu

电力负荷管理技术　(electric load management technology)　对用电负荷实施监测、控制和管理的手段、方法和技能的总称。它集成现代通信、信息网络、自动控制和用电管理等多项技术，对用电负荷实施专项管理，是电力需求侧管理最重要的技术手段之一。这项技术的应用，对缓解电力供需矛盾、保证电力供应、提高电力使用效率、保障电力系统安全经济运行等发挥了重要作用，促进了电力资源的合理配置和利用。

电力负荷管理技术的核心是电力负荷控制技术和电力负荷管理系统。

电力负荷控制技术　一般分为间接控制与直接控制两类。

间接控制　以行政或立法手段，通过电价等激励政策，用行政命令或经济措施使用户自行进行用电负荷调整，是从电力工业发展之初到现在仍在使用的控制方式。

直接控制　按有序用电方案规定的方式，通过电力负荷管理系统对用户进行用电负荷调整。(见用电负荷管理)

按控制对象分，直接控制有负荷控制和电量控制两种。①负荷控制有峰段负荷控制、谷段负荷控制、最大需量控制。②电量控制有枯水期电量控制、丰水期电量控制以及峰电量、谷电量、日电量、月电量控制。

按控制方式分，直接控制又分为分散控制和集中控制两种。集中控制与分散控制相比较，其应用更为灵活，更加适应发电能力变化和用电负荷变化的要求。①分散控制是在用户侧装设各种功能的当地控制装置，如开关钟、分散型定量器以及各种电力测控仪。②集中控制是由负荷控制中心通过

信道传输控制指令到用户侧接收端，自动控制用户端的用电设备的系统。其信道的种类又分为有线信道和无线信道；信号的传输频率又分为工频、音频和载波3种。

电力负荷管理系统 采集客户端实时用电信息的基础平台，以计算机、通信、自动控制技术实现对电力负荷的监控与管理，在电力需求侧管理和营销管理中得到了广泛应用。

系统构成 电力负荷管理系统由主站、子站、中继站、信道及终端等组成，如图1所示。

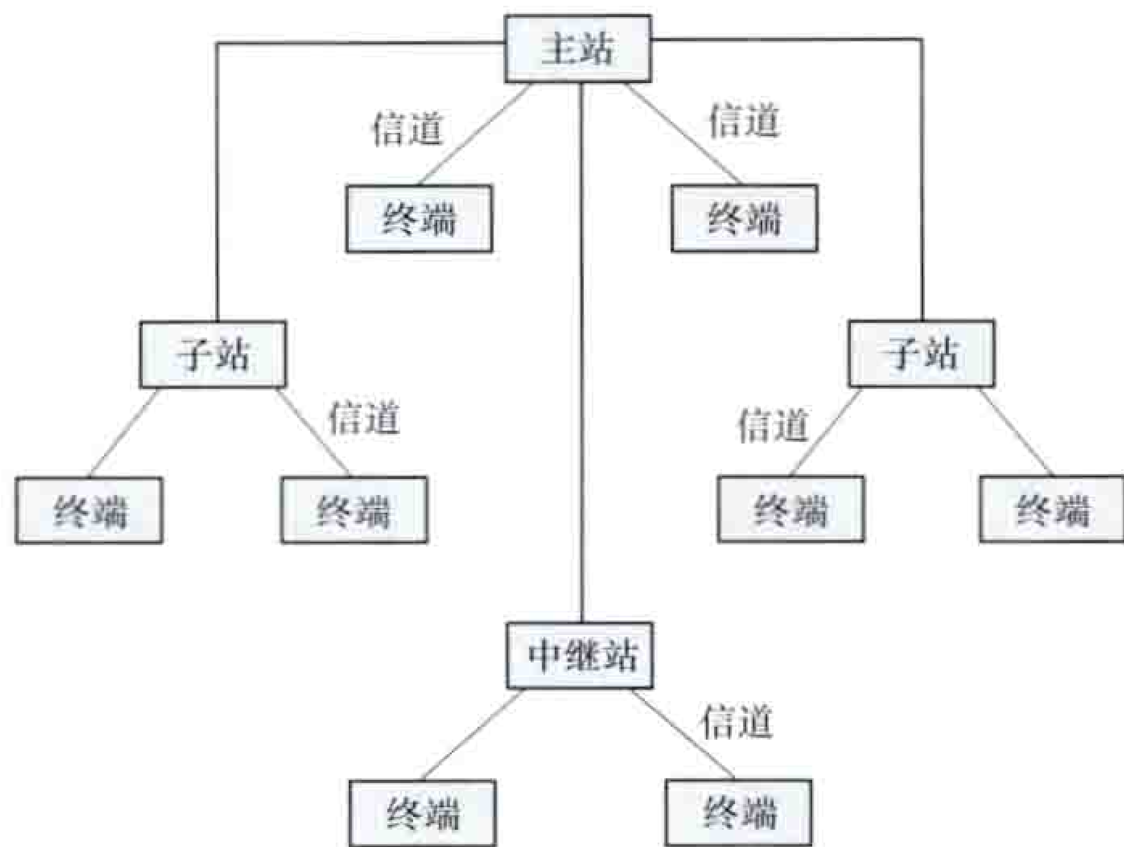


图1 电力负荷管理系统构成

(1) 主站。或称主站系统、中心站、管理中心，是电力负荷管理系统的核心。由计算机系统（服务器、前置机、工作站、存储设备等）、网络设备、专用通信设备等硬软件构成。

(2) 子站。或称分站、分中心，是为实现系统分区域管理而设置的二级主站。

(3) 中继站。在管理范围过大或受地形限制的条件下，实现通信接力的基站。

(4) 信道。或称通道，是连接主站和终端之间的通信介质、有关的变换装置（如发送设备、接收设备、调制器、解调器等）以及传输和通信协议等的总称。

(5) 终端。安装在客户侧，用于实现负荷管理功能的智能装置。它具有数据采集、遥控跳合闸、当地闭环控制、保电、剔除、通话、数据转发、本地维护、初始化等功能。负荷管理终端有单向负荷控制终端和双向负荷管理终端。单向负荷控制终端只能接受主站命令，又分为遥控开关和遥控定量器两种。双向负荷管理终端能与主站进行双向数据传输并实现当地控制的操作。

系统功能 电力负荷管理系统的功能包括数据采集、负荷控制、数据处理、数据传输、事件处理、日常业务处理、系统管理等，如图2所示。

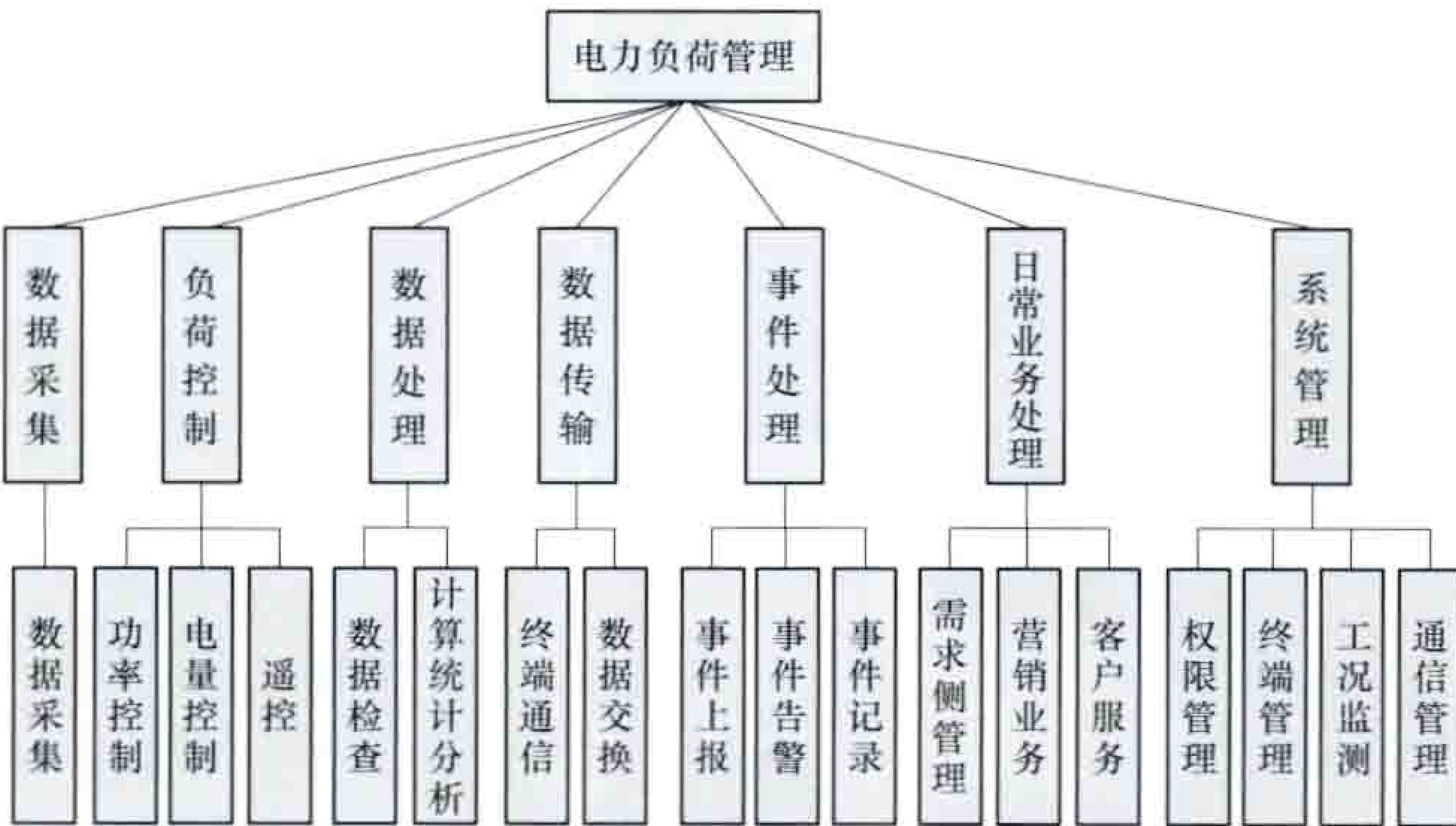


图2 电力负荷管理系统功能结构图

(1) 数据采集。包括定时自动采集或是随机召测用电负荷数据（有功功率、无功功率、最大需量）、电能量数据（有功电能量、无功电能量）、抄表数据（电能表实时数据、冻结数据）、用电工况数据（开关状态、电能表工况）以及电能质量数据（电压、电流、功率因数、谐波），生成日、月负荷曲线，总加有功及无功电能量曲线等。

(2) 负荷控制。包括功率定值闭环控制（功率时段）、电能量定值闭环控制（日、月电量）、无功补偿控制和遥控（自动巡测、人工召测）等控制方式以及保电与控制剔除功能。在功率和电控时，可按轮次投入或切除开关。

(3) 数据处理。具有数据的合理性检查和分析、数据的计算和统计分析等功能。对用电负荷、电能量、电压、电流、功率因数、谐波等运行量进行统计分析处理。

(4) 数据传输。具有主站与终端间的数据传输功能。同时，具有电力负荷管理系统与营销业务应用系统的双向数据交换功能。电力负荷管理系统将采集到的用户电能量信息、负荷控制状况等传输给营销业务应用系统，并从营销业务系统获得用户用电的基本档案信息。

(5) 事件处理。具有主站接收终端的事件上报及告警处理功能，可查询终端的一般事件及重要事件记录，并能存储和打印相关报表。

(6) 日常业务处理。包括负荷分析、有序用电方案执行、远程抄表、电费催收告警、电能表运行状况分析、线损统计分析、用户信息查询、供电信息发布等营销与服务的日常业务处理工作。

(7) 系统管理。具有分级权限管理、终端管理、通信管理、故障管理等功能。

参考书目

张峰．电力负荷管理技术．北京：中国电力出版社，2005.

Dianli Gongying yu Shiyong Tiaoli

《电力供应与使用条例》 (*Electric Power Supply and Utilization Rules*) 调整供用电关系，规范电力供应与使用行为的行政法规，是中国电力法体系的重要组成部分。该条例根据《中华人民共和国电力法》第二十四条规定制定，于1996年4月17日由国务院正式颁布，1996年9月1日起正式施行。《电力供应与使用条例》的施行，结束了中国供用电管理虽有章可循但无法可依的历史。电力供应作为一个特殊的行业，供应范围大，服务对象多而分散，供应和使用方式也与其他商品不同，特别是电力供应与使用中的安全、经济及权益保障等问题更为社会所关注。



中华人民共和国
电力供应与使用条例

世界各国都采用法律手段来调整供用电之间的关系，规范供用电及供用电管理行为。美国、英国、日本、法国等国家是供用电管理法规比较健全，也是立法较早的国家。中国在1953年，为了调整供用电关系，颁布了《供用电暂行规

则》，之后，政府主管部门于 1963、1966、1972、1983 年先后 4 次对该规则进行了修订（见《供电营业规则》），对电力供应与使用过程中的各类行为起到了很好的协调、约束和促进作用。随着社会的发展，1983 年颁布实施的《全国供用电规则》的法律效力已显不足，难以调整和规范供用电双方新的利益关系和管理关系，通过立法调整供用电关系是历史发展的必然趋势。

《电力供应与使用条例》的核心内容是保障供用电双方的合法权益，所要调整的关系，都是以保障供用电双方的合法权益为目标来界定的。特别是供电营业区、供电质量、供电服务要求、供用电合同、监督管理、法律责任等方面的管理内容，不仅有政府管理供用电活动方面的规范内容，而且有平等民事主体之间经济活动的内容和民事损害赔偿的内容，具有清晰的法律特征。

适用范围与效力　《电力供应与使用条例》适用的地域是中华人民共和国境内，凡是在中国境内从事与电力供应与使用活动有关的一切组织、个人以及与其相关的行为都受其约束和调整。这是维护国家主权，保护国家利益的需要。适用的行为是指电力供应与使用行为以及与其相关联的行为，包括供电企业供电及与其相关的行为、用户使用电力及与其相关的行为、其他与电力供应与使用有关的组织或个人的行为，如政府监督管理供用电的行为，供（受）电设施设计、安装、试验行为，建设规划、施工与电力设施相互关联的行为，窃电行为等。

调整的法律关系　《电力供应与使用条例》调整的主要对象是与电力供应和使用有关的社会关系，包括供用电管理关系、协作关系、经济关系等。调整的主要法律关系有：①供电企业与用户在电力供应与使用过程中发生的经济的、民事的法律关系，而合同关系是供用电双方之间最基本的法律关系。②供电企业与供电企业之间在电力供应过程中产生的法律关系。供电营业区、电力电量交换或趸购转售电，是产生法律关系的主要环节。③供电企业、用户与第三者发生的法律关系。主要反映在供（受）电设施的设计、安装、施工质量或者相互妨碍而发生事故时的责任界定等。④国家在管理电力供应与使用过程中产生的法律关系。如国家电力管理部门对供电企业与用户行使供用电监督管理或对某一个问题进行协调时发生的法律关系。⑤其他关系。如供电企业与主管的电网经营企业之间产生的法律关系，用户与其主管部门的关系等，主要是企业内部的业务管理关系。除有特殊需要调整的，一般靠行政管理来解决。

基本原则　《电力供应与使用条例》体现的基本原则，集中反映了国家在电力供应与使用管理方面的意志，体现了国家在供用电管理方面的主要方针、政策和办法。主要是：①保障供用电双方合法权益，保护其他与供用电有关的组织和个人合法权益相结合的原则；②电力供应实行按供电营业区专营的原则；③供用电法律关系民事主体平等原则，即合同关系是基本法律关系原则；④保障公共安全的原则；⑤有偿使用电力的原则；⑥供用电管理实行政府监督的原则；⑦实行安全、节约、计划用电的管理原则；⑧电力运行事故实行有过错赔偿原则；⑨法律责任对等原则；⑩对供用电监督人员、用电检查人员、电业工作人员以及承装（修、试）单位实行资格许可制度的管理原则。

主要内容　《电力供应与使用条例》共 9 章 45 条，其内容和条文按照政企职责分开，加强管理，明确责任，保障供用电双方合法权益的原则设置。

第一章：总则，共 7 条。分别规定了立法目的与依据、适用范围、行政主管机关、业务主管部门、电力供应与使用管理原则以及禁止的行为。

第二章：供电营业区，共 4 条。分别规定了划分供电营业区的基本原则、划分供电营业区的权力机关和法定程序、权益的保护以及例外事项。

第三章：供电设施，共 7 条。分别规定了城乡电网规划及有关部门职权、公用路灯建设与维护、供（受）电设施标准、供电设施建设相邻关系处理、供电设施维护管理等。

第四章：电力供应，共 10 条。分别规定了供电质量、供电方式、抢险救灾供电以及新装与变更用电、终止供电的程序；电价、电能计量、电费计收办法；停止供电条件与程序等。

第五章：电力使用，共 3 条。分别规定了安全用电、节约用电、计划用电管理原则，严禁违章用电和窃电行为等。

第六章：供用电合同，共 4 条。分别规定了合同的签订原则，合同主要条款，合同的履行、变更、解除等。

第七章：监督与管理，共 2 条。分别规定了各级电力管理部门加强对供用电监督管理的权限、范围、纪律等事项。

第八章：法律责任，共 7 条。分别规定了违法行为应承担的行政法律责任、民事法律责任、经济法律责任、刑事法律责任的形式、种类及应当受到的处罚措施等，包括电费滞纳违约责任、违章用电与窃电处理、供电责任、违反合同责任等。

第九章：附则，共 1 条。规定了《电力供应与使用条例》的生效日期。

配套规章制度　为了进一步加强对电力供应与使用活动的监督管理，根据《中华人民共和国电力法》《电力供应与使用条例》确立的原则和授权，由原电力工业部制定了 5 个配套行政规章制度，进一步细化了便于操作管理的条文：①《供电营业区划分及管理办法》；②《供用电监督管理办法》；③《用电检查管理办法》；④《居民用户家用电器损坏处理办法》；⑤《供电营业规则》。

dianli jiche

电力机车　(electric locomotive)　从接触网上获取电能并通过牵引电动机将电能转换为机械能来驱动车轮运行的机车。电力机车（见图 1）是铁路牵引机车的一种，具有



图 1　北京北站至八达岭的电力机车（严浩　摄）

功率大、效率高、过载能力强、牵引及制动力大、起动加速快、制动距离短、运营和维修成本低、整备作业简单、不污染环境等优点。采用电力机车能提高运输能力，改善服务条件，在运输繁忙的铁路干线和隧道多、坡度大的山区困难线段以及寒冷地区更能发挥其优越性。

组成 电力机车通常由机械部分、电气部分及空气管路部分组成。

机械部分 包括转向架和车体。转向架是电力机车的走行部分，承载着车体连同安装其内设备的所有质量，对确保行车安全，改善机车走行品质，提高机车运行速度等有着极其重要的作用。转向架承载车体并将车体质量通过悬挂装置均匀地分配到各个轴箱上，最后经轮对作用于钢轨。一台电力机车一般由2台转向架组成，每台转向架二轴或三轴，也有的电力机车由3台二轴转向架组成（SS7型电力机车）。转向架主要包括轮对电动机驱动装置、构架、一系悬挂装置（轴箱悬挂装置）、二系悬挂装置（车体支承装置）、牵引装置、电动机悬挂装置、基础制动装置、传动装置（齿轮装置）和辅助装置等主要部件，见图2。转向架起着承载、传力、转向的作用。当机车牵引列车运行时，牵引电动机产生转矩，通过齿轮或传动装置使车轮转动。轮对与钢轨之间由于黏着作用产生轮周牵引力，牵引力通过轴箱传至构架，再通过牵引装置传到车体，最后经车体牵引列车运行。转向架对机车动力学性能、运行平稳和安全性能起着决定性作用。

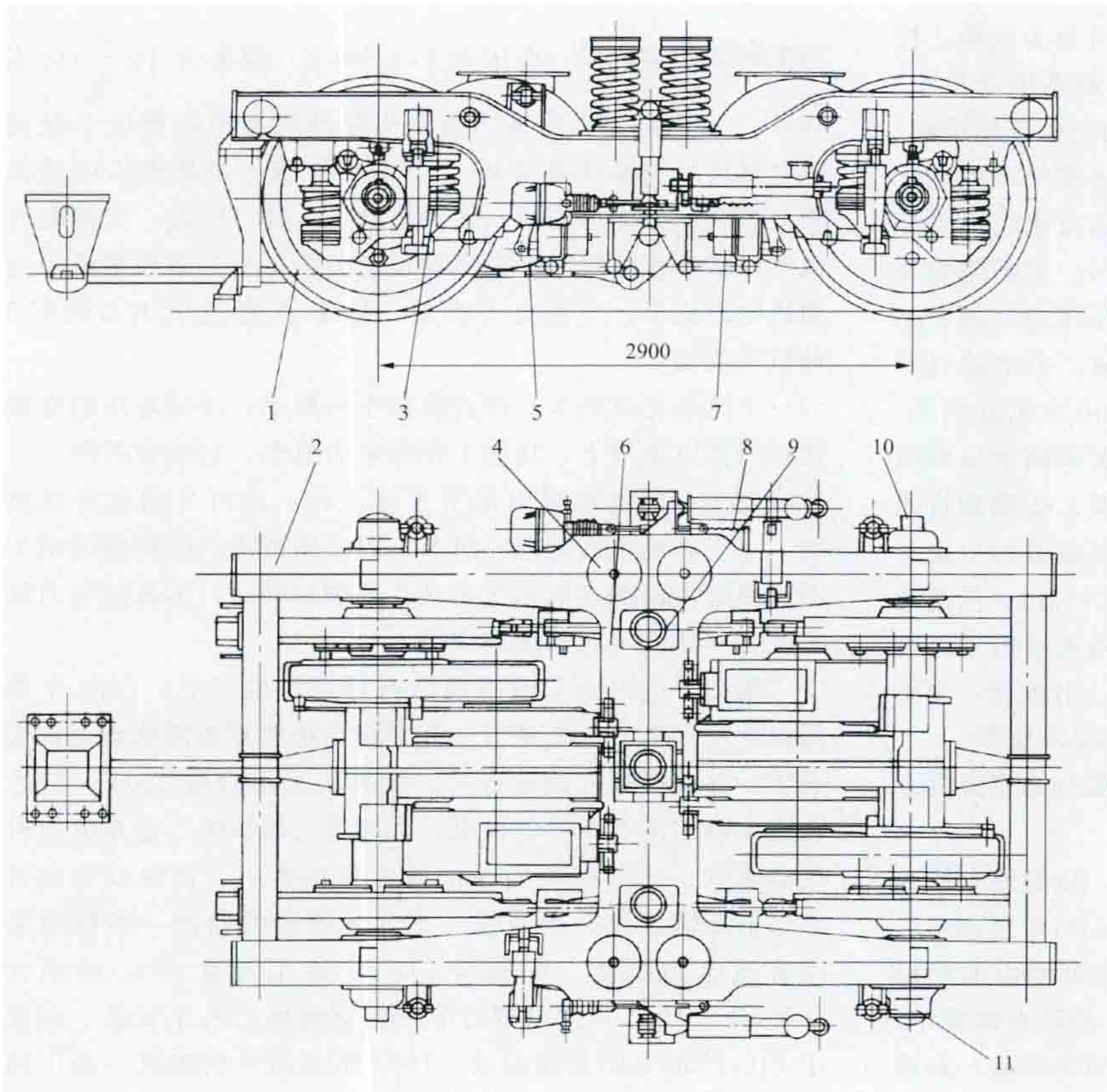


图2 SS8型电力机车转向架（单位：mm）
1—轮对电动机驱动装置；2—构架；3—一系悬挂装置；4—二系悬挂装置；5—牵引装置；6—电动机悬挂装置；7—基础制动装置；8—蓄能制动装置；9—辅助装置；10—测速防空转传感器；11—接地线装置

车体是电力机车的主要承载部件，除走行部分外的所有机械、电动机和电器装置都安装在车体上。在运行过程中，车体要传递牵引力和制动力，要承受垂直载荷，还要承受水平方向的冲击载荷和侧向力的作用。所以车体必须有足够的强度和刚度，以保证机车运行的安全性和平稳性，同时为车内设备安装、检查、维护提供足够的空间，并保证车内设备正常运转。列车供电方式改造后的电力机车设备布置见图3。在设计车体外形时必须考虑良好的空气动力性能，减小运行中空气阻力，对高速电力机车，这点尤为重要。

电气部分 电力机车上各种电动机、电气设备按功能、作用和电压等级分别组成三个独立的电路系统：主电路、辅助电路和控制电路。三个电路通过电-磁、电-空气、电-机械联系起来，对机车进行控制。

主电路是产生机车牵引力和制动力的电路，主要由受电弓、主变压器、整流装置、牵引电动机和有关高压电器组成。主电路的作用主要是将来自接触网（见电气化铁路接触网）的电能转变为机械能，产生机车的牵引力；当机车在电气制动状态时，将列车的机械能转变为电能，产生机车的制动力。主电路组成包括网侧电路（由受电弓、主断路器、主变压器高压绕组、车体、轮对组成）、变流调压电路、牵引和制动电路。

辅助电路是给机车辅助设备供电的电路。辅助设备主要包括辅助电源（劈相机或辅助逆变器）、各类冷却通风机电动机、空气压缩机电动机、油泵电动机、列车供电用的设备、机车取暖设备、空调设备等自用电设备。辅助设备的电动机一般采用三相异步电动机。辅助电路的组成主要包括辅助电路供电系统，单相、三相负载电路，保护电路。其中保护电路主要是辅助回路的过电压、过电流、接地保护和确保人身安全的安全保护等。

控制电路主要是控制各种电器按规定指令和程序动作，实现各种工况，以保证机车按要求运行。控制电路可分为有触点控制电路和无触点控制电路。有触点控制电路包含控制电源设备，各种继电器、接触器；无触点控制电路包括机车的微机、信号、通信、故障显示等电子设备电路。控制电路按控制功能可分为：①整备控制。机车动车前的各项预备性操作控制，如升受电弓，合主断路器，起动劈相机、空气压缩机、通风机以及机车前进或后退、牵引或制动操作转换等。②调速控制。③机车运行状态和主要故障的信号显示控制。④保护控制。⑤照明控制。

微机技术已应用到机车控制上。微机系统根据司机给定的手柄级位以及实际电枢电流的机车速度来调节晶闸管的触发角，实现对机车的牵引控制、制动控制、防空转防滑保护、空电联合制动控制等功能，使机车稳定运行。同时微机系统具有故障监控、故障记录、检索和故障诊断功能等。（见电力机车控制）

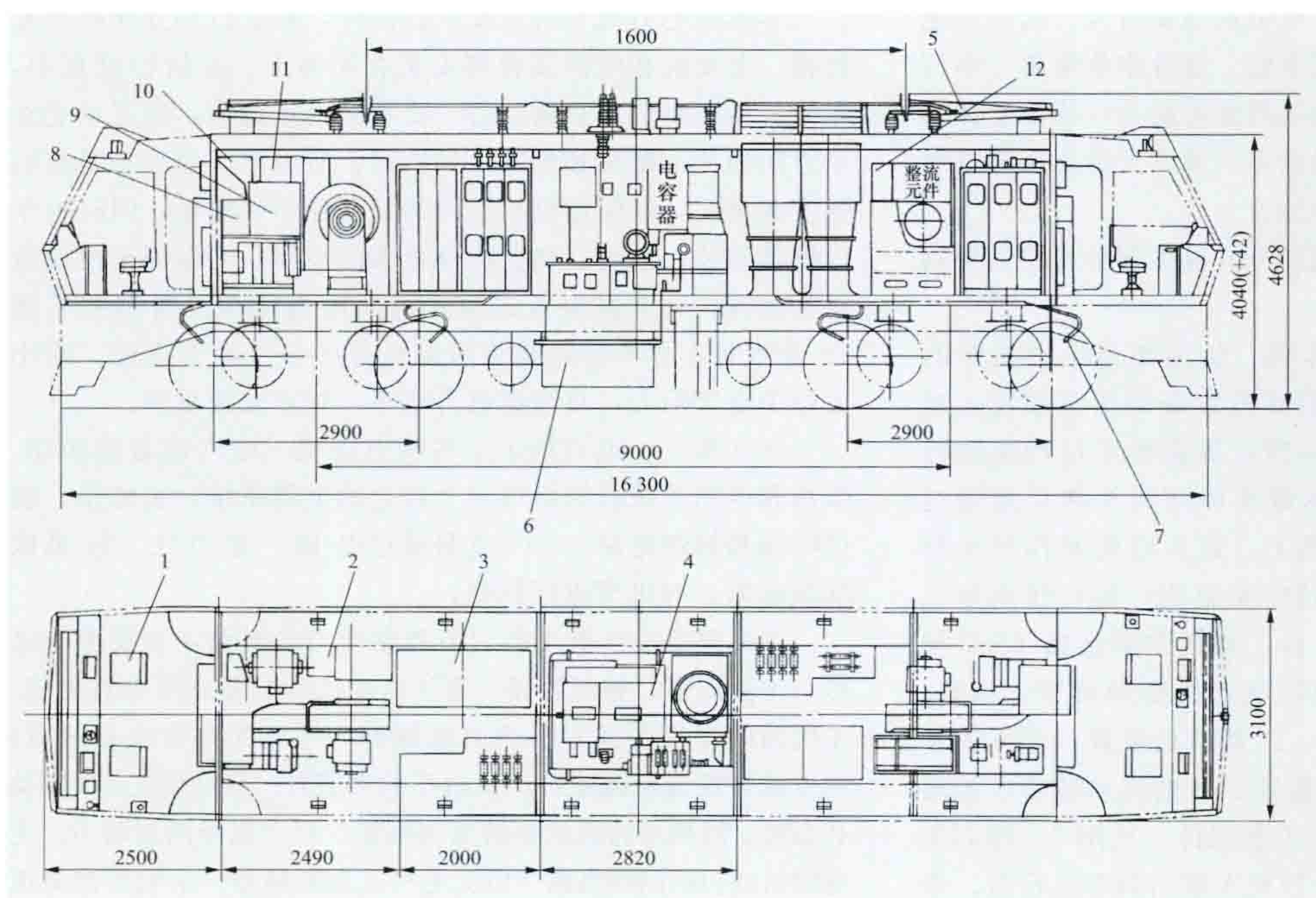


图 3　电力机车设备布置总图（单位：mm）

1—司机室设备布置；2—机械室设备布置；3—电器室设备布置；4—变压器室设备布置；5—车顶设备布置；6—辅助设备布置；7—机车布线；8—信号柜；9—工具柜；10—隔离变压器；11—逆变电源；12—电流、电压传感器同步变压器

空气管路部分　空气管路直接影响机车的工作可靠性及运行安全，是机车的重要组成部分，按功能可分为风源、控制管路、辅助管路及制动机四大系统。①风源系统为机车、车辆提供洁净、干燥和稳定的压缩空气。它由空气压缩机组、空气干燥器、主风缸及各种阀门组成。空气压缩机产生的压缩空气储存在主风缸中，作为机车和列车制动及机车上各种气动器械的风源。②控制管路系统为向受电弓、主断路器和高压开关柜内转换开关、电-空接触器等提供压缩空气的管路系统。它由辅助压缩机、控制风缸、辅助风缸、分水滤气器及各种阀门组成。控制管路系统正常运用时由主风缸供风，机车停放后再次起动，主风缸压力不足时，起动辅助压缩机向控制管路供风，满足机车升弓、合闸的需要。③辅助管路系统为供给机车的撒砂装置（可在机车起动时或运行中发生空转时向轨面上撒砂，增加轮轨间摩擦力防止打滑）、汽笛及刮雨器等所需压缩空气的管路系统。辅助管路系统由主风缸供风。④制动机系统主要由制动控制器（阀）、分配阀、中继阀等组成，其作用主要是操纵机车和列车的制动和缓解。

分类　按供电系统的电流制电力机车一般分为直流电力机车、交流电力机车和多流制电力机车。

直流电力机车　在直流供电系统下运行，以直流电作为动力源的电力机车。直流电力机车供电电压有直流 75，120，1500，3000V 或其他电压等级。由于直流牵引电动机（见直流电动机）起动力矩大，速率特性好，调速方法简单、容易，因此，绝大部分机车采用直流牵引电动机驱动。直流电力机车的调速方式有电阻调速（见直流电动机电枢串电阻调速）、调压调速（见直流电动机调压调速）、调磁调速（见直流电动机调压调磁调速）和斩波调速（见斩波控制直流调速）。早期直流电力机车利用起动电阻和牵引电动机串并联组合方式进行起动并配合磁场削弱进行调速。这种起动和调速方法的缺点是机车牵引力不能平滑地调节而是有级调节，其调速级位有限，能耗大，效率低。由于电子技术、直流斩波技术的出现，直流斩波调压调速的方式已经取代旧的调速方式，使直流电力机车的调速控制技术有了很大的改进。直流电力机车已采用逆变技术将直流电逆变为变频变压的三相交流电，驱动三相异步牵引电动机。直流电力机车一般应用于冶金、煤矿、化工等工矿企业和地下铁道。英国、法国和日本等国家旧的干线铁路也有应用。

交流电力机车　在交流接触网供电系统下运行，以交流电作为动力源的电力机车。一般交流电力机车供电电压有 20kV 和 25kV，频率有 50Hz 或 60Hz，欧洲有些国家如德国、瑞典、瑞士等采用低频单相交流制，电压为 11～16kV，频率为 $16\frac{2}{3}$Hz 或 25Hz。交流电力机车采用的牵引电动机有单相整流子电动机（见交流整流子电动机）、直流（脉流）串励牵引电动机和三相交流异步（同步）牵引电动机 3 种。因此，交流电力机车根据变流装置和牵引电动机的类型可分为单相整流子电动机电力机车、交直电力机车、交流-直流-交流电力机车 3 种机车类型。

多流制电力机车　在直流和不同频率、不同电压的交流接触网供电条件下，均能工作的电力机车。它能在两种、三种或更多不同的供电电压下正常工作，也可分别称为双流制、三流制或多流制电力机车。因应用范围广故特别适用于不同供电电流制式的电气化铁路或国际联运。多流制电力机车在日本和欧洲有较多的应用。

简史　电力机车的出现已有百余年的历史。1879 年德国设计一台电力机车牵引三节车辆在柏林夏季博览会上首次展出，并获得载人试验成功。该机车采用直流 150V，以在轨道一侧的供电用导轨供电，俗称第三轨供电，这是电力机车的雏形。1890 年英国在伦敦地下铁道中，首次以电力机车牵引车辆正式开始运营。1895 年美国铁路的一段隧道采用直流电力机车，电压为 675V，机车自重 97t，功率为 1070kW。1903 年德国进行了三相交流电力机车试验，创造了 210.2km/h 的高速纪录。1933 年在匈牙利建成一条工频单相交流制电气化铁路，采用旋转式变流机组及三相异步电动机的交流电力机车，但因结构复杂未能得到推广。法国于 1955 年进行了四种电力机车的选型比较试验，其中静止式整流器电力机车和直流牵引电动机试验成功，于是许多国家

相继采用单相工频制，工频单相交流电力机车开始在世界上迅速发展。

中国的电气化铁路起步就采用了25kV工频单相交流制式。中国第一台交流引燃管电力机车是1958年12月由铁道部田心机车厂和湘潭电机厂联合试制组装的，命名为韶山1型（SS1）电力机车。随着电器和电子器件的发展和应用，中国交直电力机车的调压调速技术，经历了从第一代韶山1型（SS1）、韶山2型（SS2）电力机车的低压侧或高压侧调压开关调幅式的有级调压调速技术，第二代韶山3型（SS3）电力机车调压开关分级和级间晶闸管相控平滑调压相结合的调压技术，到第三代韶山4型（SS4）至韶山8型（SS8）电力机车多段桥晶闸管相控无级平滑调压调速技术的发展。1994年中国研制的韶山8型（SS8）准高速客运电力机车见图4。1996年6月中国第一台交-直-交AC4000型电力机车的研制成功，表明中国电力机车技术已进入交流传动技术领域（第四代电力机车）。1997年中国研制的韶山7B型（SS7B）大功率货运电力机车见图5。1997年经试制并投入批量生产的SS8型电力机车是中国功率最大的准高速客运交直电力机车，其单轴功率900kW，总功率达3600kW，设计持续速度达100km/h，最高速度170km/h。1998年6月，经高速试验改进的SS8型0001机车在京广线创造了239.6km/h的高速纪录。



图4　1994年中国研制的韶山8型（SS8）准高速客运电力机车



图5　1997年中国研制的韶山7B型（SS7B）大功率货运电力机车（列车牵引5000t）

2006年12月8日，首批时速120km/h、单机牵引5000t“和谐”型国产化大功率交流传动电力机车交付使用，标志着中国铁路机车行业成功实现由直流传动向交流传动的转化。

截至2013年底，中国已建成的电气化铁路营业里程达5.58万km，电化率54.1%；全国铁路机车拥有量2.08万台，电力机车占52.1%，国产6轴7200kW、8轴9600kW和6轴9600kW大功率电力机车已大批量投入使用。大功率、高速度、高运能、安全可靠、节省能源、低噪声、少维修和无维修是电力机车的发展方向。

dianli jiche kongzhi

电力机车控制　（electric locomotive control）　用电力机车的操作与控制装置，控制电力机车的主电路及辅助电路的电动机、电器，使之按照规定的程序动作，并发挥机车的牵引、制动能力，控制列车的运行状态，安全、经济、可靠地完成运输任务。

分类　可分为人工控制即手动控制（也称司机驾驶）及自动控制两种，还可分为有级（非连续）控制和无级（连续）控制两种。

人工控制　由司机操纵控制器、有关控制开关、接触器、继电器、电控阀、电子控制装置等完成机车的前进、后退、加速、减速、起动、停车等作业。

自动控制　由司机选定指令信号后，通过机车各种电气自动控制装置，实现机车各种技术性能的控制，如恒转矩起动、恒功率运行、恒速控制、防滑行、空转、再生制动以及故障自动监测等。

一般在机车运行速度较低的情况下（低于120km/h）可由司机手动控制；但在高速运行时（高于200km/h），凭借司机的视力及听力来不及反应和监视，必须由自动控制装置控制列车运行。在自动控制时，司机能够更集中注意力以保证列车安全运行。

有级控制　早期的电力机车控制系统，较多是有触点的组合电器，如组合调压开关、反向器、控制器等。它们的控制过程是有级的、非连续的。

无级控制　现代电力机车大多采用各种半导体和微电子技术的无触点自动控制装置，控制过程是自动连续的，使机车的性能有很大提高。

控制原理　有手动（人工）控制、开环自动控制、闭环自动控制和双闭环自动控制等系统。

手动（人工）控制系统　以韶山型电力机车控制电力机车的起动过程为例。司机将控制器手柄放在“固”位与“升”位之间反复移动，调压开关则逐级进级，电压逐级升高，机车的起动电流在规定值之间（最大值与最小值）摆动，直至起动结束，整流电压达到牵引电动机的额定电压，电力机车按其自动速度曲线运行。这种电力机车运行中各种参数（电压、电流、速度、牵引力等）的改变，均需司机手动操作控制系统，属于有级（非连续）控制。

开环自动控制系统　司机有时为了提高机车速度，将控制器调速手柄放在“快升”位，此时，调压开关在伺服电动机带动下连续进级升压，机车速度也迅速自动提高。这时控制系统、电器的动作顺序和线路的转换都自动进行，但机车参数（电压）的改变仍是有级的（非连续的）。这种控制方式为非连续的自动控制，因控制系统中没有反馈回路，故称

开环自动控制系统，见图 1。

闭环自动控制系统　具有晶闸管级间调压的韶山 1 型电力机车及法国制造的 6G 型电力机车的恒流起动装置均属于无级（连续的）自动控制系统。根据线路条件、牵引参数、牵引列车类别选定合适的起动电流值，并将司机控制器手柄放在恒流起动位置上。机车在起动过程中起动电流维持选定数值不变。随着列车速度升高，牵引电动机的反电动势增加，此时通过自动调节系统的作用，外加于牵引电动机的整流电压也相应提高，从而保持起动电流值仍是恒值不变。恒流起动可以充分地利用机车的黏着重量，缩短起动时间。这种控制系统不仅电器的动作和线路的转换都是自动进行，而且机车的起动电流也是平滑连续地自动调节，保持恒值，故为连续的自动控制。在此系统中通过反馈回路的检测机构将被控对象的被调节参数送回并与给定值比较，然后将其差值输入控制机构对被控参数进行再调整，形成闭环自动控制系统，见图 2。

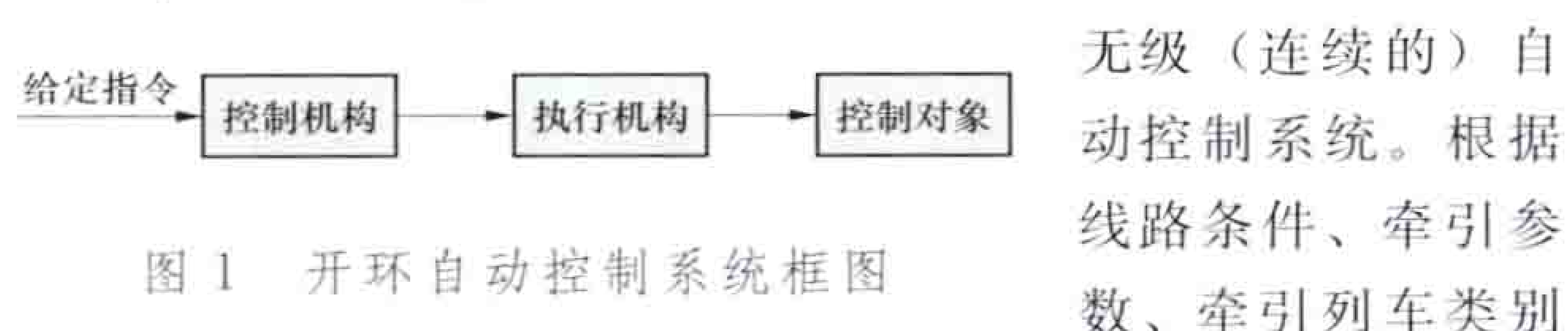


图 1　开环自动控制系统框图



图 2　闭环自动控制系统框图

闭环自动控制系统的给定值可以是牵引力、速度或功率，比较器将给定值与检测值的比较差值 $\pm\Delta e$ 传给调节器处理，按一定的函数关系，将调节变量传给执行机构。

双闭环自动控制系统　电力机车是一个惯性很大的系统，为了得到准确、稳定、响应快的调节效果，常用双闭环自动控制系统（见图 3）。该系统以速度调节为主调环节（外环），电流（牵引力）为辅调环节（内环）。外环实现司机指令的调节，内环实现执行环节的控制，外环的输出作为内环指令。图 3 中 v_g、v_f 为给定速度与反馈量；I_g、I_f 为电流给定与反馈量；α 为整流桥（执行单元）的电压控制角；U_d 为整流电压。这种闭环调节系统对于机车调速，有良好的静态和动态调节特性。

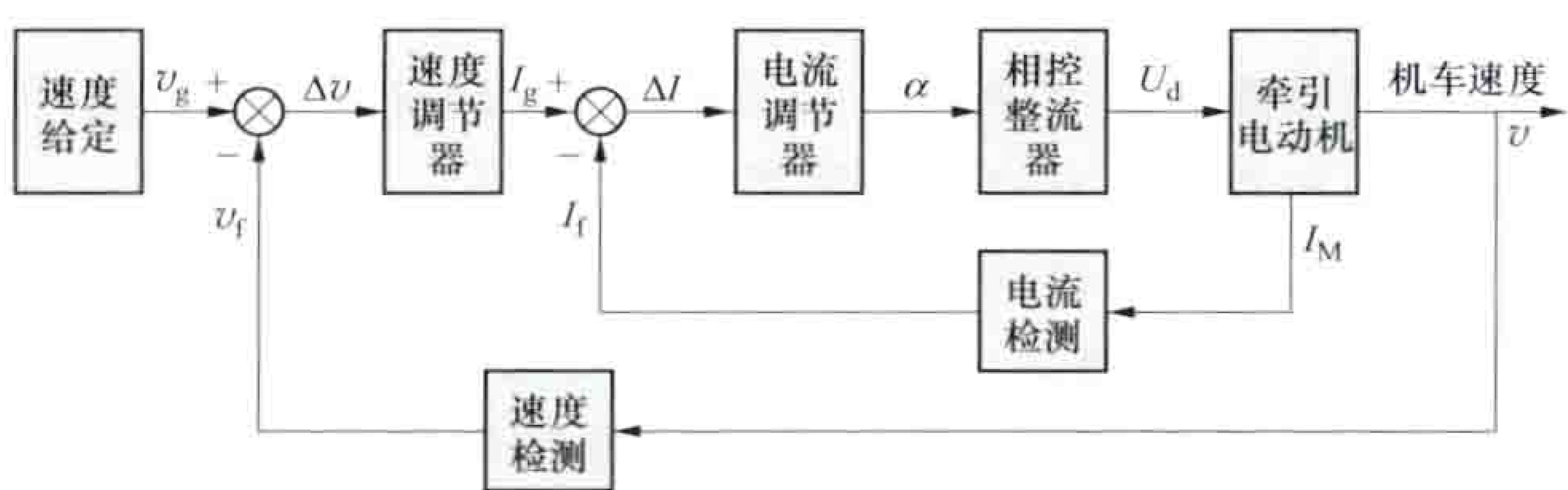


图 3　双闭环控制系统框图

直流、交流电力机车的控制　分起动控制、调压控制和相控调压控制。

起动控制　控制电力机车起动是机车基础工况之一，也是考核司机操作水平的一项基本指标。机车的起动是控制速度由零逐渐上升到运行速度的加速过程，也是一种速度调节。

起动要求：一般按直流电力机车和交流电力机车两大类考虑。对起动的基本要求是快速平稳，且起动过程中能量损耗小。电力机车起动受线路黏着条件和牵引电动机换向条件的限制。随着电力机车牵引电动机的不断发展和完善，完全可以保证在黏着条件允许范围内具有良好的换向，所以电力机车的起动实质上仅受线路黏着条件的限制。增大起动电流（即牵引力）虽能缩短起动过程，但起动电流不宜过大，如果超出黏着条件允许，破坏了轮轨之间的黏着，机车则发生空转，反而降低牵引力。

电力机车理想的起动控制方式是无级平滑起动，保持起动电流恒值，即所谓恒流起动。其优点是可保持起动电流和起动牵引力不变，使黏着条件一直维持在最佳状态，发挥大的起动牵引力，缩短起动过程，并可平稳起动，没有机械冲击。晶闸管整流器电力机车可以实现无级平滑起动。

起动方式有变阻起动和降压起动两种。

变阻起动指直流电力机车起动时，牵引电动机的电枢回路中串有起动电阻，起动过程中根据设计要求，逐级切除起动电阻，待起动电阻全部切除后，起动结束。起动电阻是按短时发热设计的，不能在电枢电路内长时间使用，只在起动过程中为限制起动电流用。变阻起动一般用于直流电力机车上，已逐渐被晶闸管直流斩波器取代。变阻起动在起动过程中有能耗损失，不能平滑无级调节，属有级调节。

降压起动方式能降低牵引电动机的端电压，限制其起动电流。因牵引电动机在起动初始瞬间还没有建立反电动势，起动电流大小主要取决于牵引电动机的端电压，所以机车起动时需降低牵引电动机的端电压。交流电力机车利用车上的牵引变压器，通过其绕组的抽头换接调节其输出电压，以降低作用在牵引电动机上的端电压。交流电力机车（尤其是整流器式电力机车）广泛采用降压起动方法。晶闸管相控调压起动也属于降压起动的一种形式。

调压控制　韶山 3 型交流电力机车采用由硅整流器与调压开关及相控桥级间调压装置组成的硅整流器 8 级晶闸管级间调压控制。机车牵引变压器低压绕组有 5 段，通过调压开关的 10 个触点与一个半控桥和一个二极管整流桥组成相当于 8 级相控桥调压系统，见图 4。在第一级时，触点 1、2 闭合，相控桥投入调压，在第 1、第 2 级转换期间，先闭合 1、

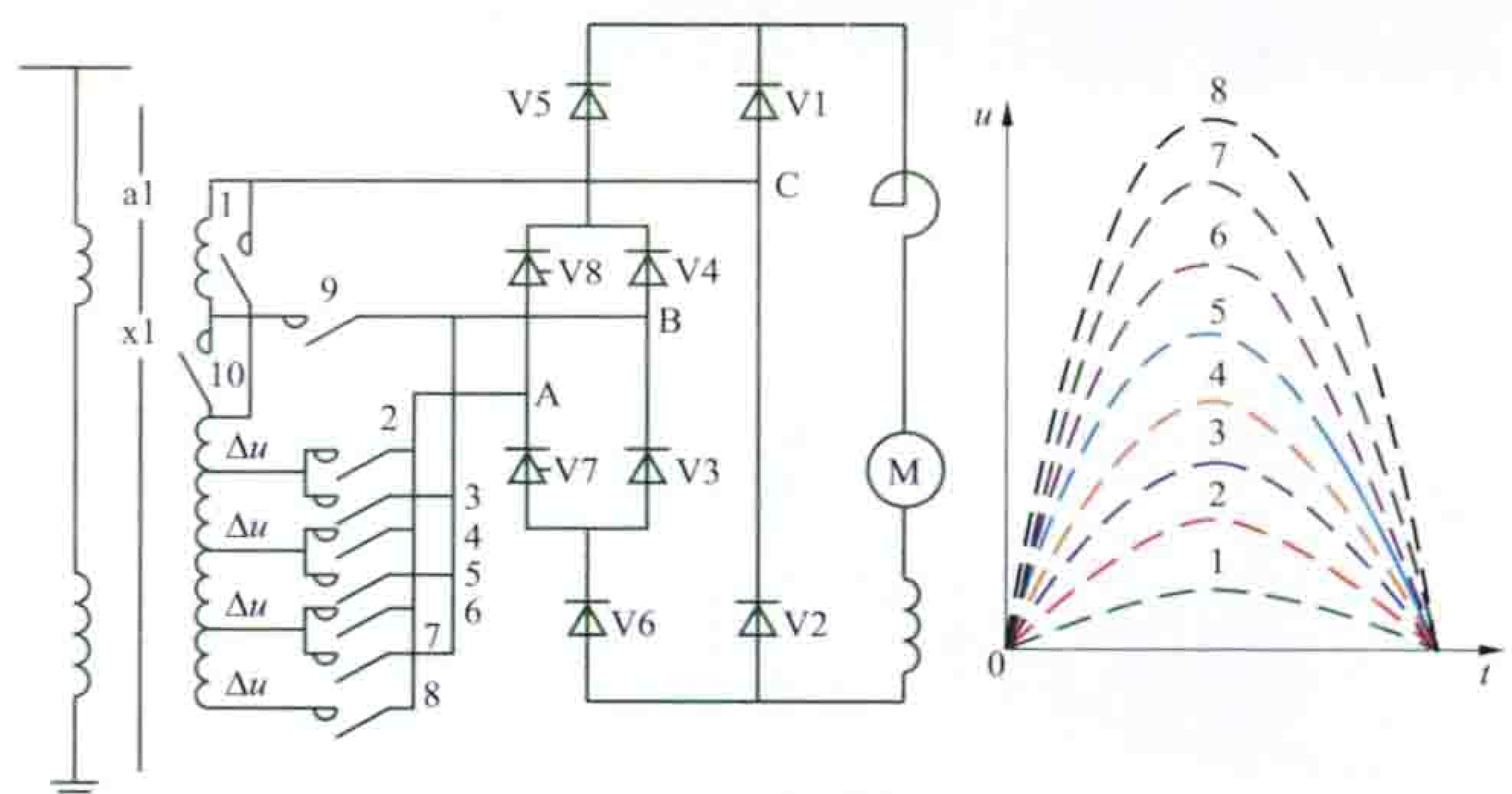


图 4　韶山 3 型电力机车调压控制示意图

2、3触点，由二极管取代半控桥，随后触点2断开，触点4闭合，进行平滑级间调压过渡。其中8级经济调压桥，可提供良好的调压效果和较高的功率因数，并可减少牵引力的冲动，有利于黏着利用。

相控调压控制　韶山4型电力机车采用4段不对称半控桥相控调压。牵引时可实现恒流或恒压闭环控制，电阻制动时，控制励磁电流，可实现恒速制动。控制系统设有防空转、防滑行及最大电流等保护装置。司机主控制器上有调速手轮及辅助手轮，用于调速及给定电流限定值，可以选定3种控制牵引力或速度方式：①恒压限流（辅助手轮在32位）可适应重载起动；②恒流限压（调速手轮在32位）可适应调车或单机运行；③主、辅手轮同步动作，用于限流、限压，快旋转相当于重载，慢旋转相当于轻载，由司机控制。电阻制动时用主轮调速，励磁电流被限定为最大值，辅轮不调节。若用辅轮控制励磁电流，则主轮不调节。制动力分为11级，二级制动电阻切换，按照车速自动实现。

交流-直流-交流电力机车的控制　交流-直流-交流电力机车的牵引电动机一般多采用异步牵引电动机，其调速控制则用变频调速。因为异步电动机的同步转速与输入电流的频率成正比，所以改变供电电源频率可以改变转子的旋转速率。一般笼型感应电动机的转子电流由定子感应产生，定子电流中既有建立磁场的无功分量，又有产生转矩的有功分量。它们与电动机电压、频率及转速有紧密的耦合关系。为了控制异步电动机的转矩和转速，必须对其定子的电压与频率进行有效控制，从而有效地控制其磁场及电流即电动机的电磁转矩。异步电动机的控制方法可以分为转差控制、磁场矢量控制及直接转矩控制。

转差控制　最先采用的控制方法，根据异步电动机的稳态理论，利用实测的异步电动机的转速频率（f_r）与给定的转差Δf之和，作为电动机逆变器的输出频率（f_s），在调速过程中保持电动机逆变器的电压（u_s）与频率f_s之比为常数（u_s/f_s=常数），调节Δf即可调节电动机的转矩。在低频段适当提高u_s以补偿定子电阻产生的压降。转差控制电路简单，但动态响应较慢，其转矩受转子电阻影响较大。

磁场矢量控制　以异步电动机的动态微分方程为依据，利用矢量变换与运算，以转子磁通的空间旋转矢量为坐标，将定子电流解耦为与磁场及转矩相对应的分量，分别加以控制，可获得良好的动态特性。它受转子电阻影响小，不需高精度的测速，但需大量的矢量运算，控制系统要求高，主电路元件要有较高的开关频率。

直接转矩控制　控制电动机逆变器，使异步电动机定子磁通空间矢量，按照预定的轨迹运行。根据定子的磁通和电流计算转矩的瞬时值，并与给定值比较，以控制磁场的“旋转”和“停止”，控制转矩在给定的误差范围内。这种控制方法与磁场矢量控制一样，有良好的动态特性，但也要求有较高的元件开关频率。20世纪90年代初，机车上开始采用这种控制方法。

dianli qianyin

电力牵引　（electric traction）　以电能为动力驱动电力机车或电动车组运行的一种牵引动力形式。它是交通运输三种牵引动力形式（蒸汽、内燃、电力）之一。电力牵引所需电能取自公用电力系统，并经专门的牵引供电系统变换成符合用电要求的电流、电压，向电力机车或电动车组等供电。电力牵引具有起动快、速度和效率高、运输量大、运营成本低和对环境污染小等优点，已获广泛应用。

分类　按运输类型可划分为：①电气化铁路。地区与地区或城市与城市间长距离客、货运输采用电力牵引的铁路，见图1。②工矿专用电气化线路。工矿企业内部运输采用电力牵引的线路。③城市轨道交通。市区和郊区以客运为主的轨道交通，见图2。



图1　电气化铁路（严浩　摄）

按接触网电流、电压制则又可分为直流制和交流制两大类。直流制按接触网（轨）电压等级分为600，750，1500，3000V 4种；交流制分为单相工频（22kV或25kV）、单相低频$\left(16\frac{2}{3}\text{Hz}、11\text{kV或}15\text{kV}\right)$和三相工频（15kV）等形式。

工矿专用电气化线路和城市轨道交通一般均采用直流制，而电气化铁路则多采用单相工频制。

特点　电力牵引的特点包括：

（1）热效率高，节约能源。电力牵引所需电力是由电力系统供给的。电力系统发、变电技术先进，规模大，效率高，一般大容量火力发电厂的热效率可达40%以上，而内燃牵引的热效率在25%以下，蒸汽牵引的热效率仅为7%，使用电力牵引能源节约的潜力十分巨大。

（2）牵引力大，运行速度高，运输能力强。电力牵引无需自备能源，因而轴功率较大，一台电力机车的总功率可达6400～9600kW，是内燃机车功率的2～3倍，是蒸汽机车功率的4倍以上；一列电力牵引的货运列车总质量可达5000t



图2　运行中的城市轨道交通（丛林　摄）

以上，部分重载电气化铁路在采用双机牵引后，列车质量可达 2 万 t。电力牵引的客运列车最高时速已达 350km/h，货运机车时速也可达 80km/h，速度提高后机车运转效率高，运输能力得到大幅加强。货运年输送能力可达 $(5\sim6)\times10^{7}$ t，重载电气化铁路的年输送能力可高达亿吨以上；客运专线年输送旅客单方向可达 8000 余万人次。

（3）牵引性能稳定，受环境影响小。寒冷地区冬季、高海拔地区低气温对蒸汽和内燃牵引的影响较大，有时可造成牵引力严重下降甚至停车，在长大隧道内蒸汽和内燃机车常因排出的煤烟或尾气影响到补机或后续列车功率的发挥。而在这些情况下，电力机车均能正常发挥其全功率。此外，牵引电动机还具有很大的短时过负荷能力，它可以在 2～3min 内过负荷 100%，而不致造成电动机损坏或使用寿命的明显缩减，因而更能适应各种突发性严重情况。

（4）乘务人员工作条件良好，旅客旅行条件舒适，图 3 所示为地铁站上下行电梯。蒸汽机车乘务人员劳动强度大，工作条件差，内燃机车乘务人员也要忍受柴油机尾气的袭扰，特别是在长大隧道内，旅客列车为了避免大量煤烟或尾气进入车厢，只得将车窗关闭，给旅客带来很大不便。电力机车不仅机车乘务人员劳动强度低，而且工作条件优越。



图 3　地铁站上下行电梯（丛林　摄）

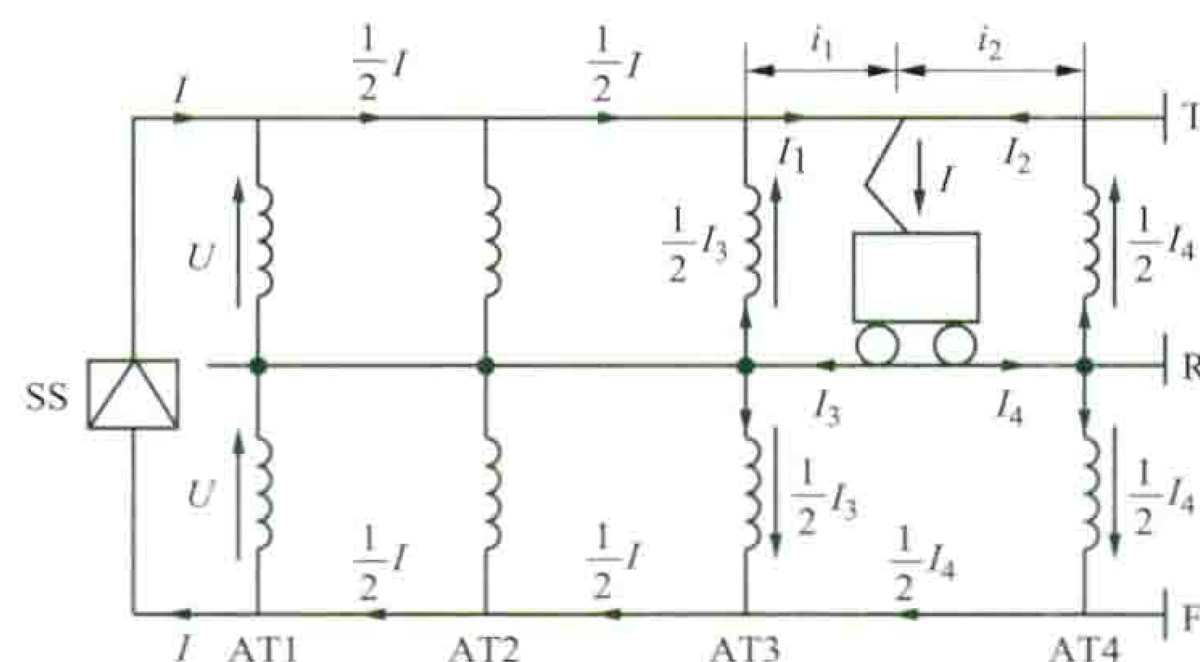
（5）电力牵引需修建专门的牵引供电系统，一次性建设投资较大。

简史　世界上第一条试验性电力牵引线路是德国西门子公司和哈尔斯公司于 1879 年 5 月 31 日在柏林建成的。牵引电动机采用直流串励电动机，由第三轨供电，供电电压为 150V。1881 年在法国巴黎国际电工展览会上展出了第一条由架空接触线供电的有轨电车线路。这条长 500m 的线路用架空接触线供电比用第三轨供电更安全，供电电压更高，为进一步提高牵引电动机功率创造了条件。1895 年，美国人 F. J. 斯普拉克设计出集中控制、分辆传动的电力牵引系统。此后，电力牵引迅速在城市交通运输中得到采用。20 世纪初，电力牵引开始应用于干线铁路运输。最初的电气化铁路接触网采用直流制供电，随着牵引质量的增加和列车运行速度的不断提高，牵引功率也不断增大，至 20 世纪 50 年代法国第一次采用 25kV 单相工频制式，使电气化铁路的技术经济效益大为提高，建设费用和运输成本显著降低，这种方式已成为电气化铁路的主要供电制式。

dianli qianyin AT gongdian fangshi

电力牵引 AT 供电方式　(power supply system with autotransformer for electric traction)　单相工频交流电气化铁路为提高供电质量和减少对通信线路的干扰而采用的一种设有自耦变压器（AT）的供电方式，又称自耦变压器供电方式。采用该供电方式时，牵引网以 2×25kV 电压供电，并在网中分散设置自耦变压器，将电压降至 25kV 供电力机车用电。（见电力牵引供电方式）

AT 供电方式的专用设备主要有与接触网平行架设的正馈线及每隔一定距离设置的低阻抗自耦变压器。正馈线为牵引负荷返回变电所的通路，选择截面时，其允许载流量应与接触网的允许载流量相等。自耦变压器的一、二次绕组匝数比采用 2∶1，一端接接触网，另一端接正馈线，中点接钢轨或扼流变压器的中性点［自动闭塞区段（见铁路信号）］。接触网及正馈线的对地电压相等，接触网与正馈线之间的电压为其本身对地电压的 2 倍。AT 供电方式实际电路及牵引负荷分配见图。图中 I 为机车中的电流，其他部分的电流为



AT 供电方式

SS—牵引变电所；T—接触网；R—钢轨；F—正馈线；AT1～AT4—自耦变压器；U—接触网及正馈线的对地电压

$$I_3=\frac{l_2}{l_1+l_2}I,\quad I_4=\frac{l_1}{l_1+l_2}I$$

$$I_1=\frac{1}{2}(I_3+I),\quad I_2=\frac{1}{2}I_4$$

AT 供电方式的特点包括：

（1）在不提高牵引网绝缘水平的条件下，将馈电电压提高了 1 倍，成倍提升了牵引网的供电能力，牵引变电所的间距可加大到 70～90km，牵引变电所数量和外部电源线路长度大为缩减。

（2）电力牵引变电所送电电压较电力机车工作电压高 1 倍，牵引网中的电流只有电力机车电流的 1/2，使牵引网的能耗和电压损失降低，供电质量改善。

（3）AT1～AT3 段接触网中的电流与正馈线电流大小相等、方向相反，对通信线路的干扰互相抵消；AT3～AT4 段接触网中的电流 I_1、I_2 数值与机车位置有关，其方向相反。因而，AT 供电方式能大大减少牵引负荷对通信线路的干扰。

（4）绝大部分牵引电流经正馈线返回牵引变电所，钢轨对地的泄漏电流极少，钢轨对地电位降低，有利于保证维修人员的安全。

（5）由于有正馈线及自耦变压器，使得牵引网变得复杂，对隧道净空要求较高，一次投资较大。

AT 供电方式是 1911 年由美国工程师 W. 阿瑟首先提出来的，1913 年在纽黑文铁路上安装试用，牵引网电压采用

的是25Hz、2×11kV。由于它技术复杂，许多电气计算问题当时未能解决，因而没有得到进一步的发展。电子计算机和电子技术的应用，为解决AT供电方式电气计算和对沿线自耦变压器运行状态进行监测提供了有效手段，因而这种供电方式重新得到重视和推广。实践证明，AT供电方式具有良好的供电性能和防干扰效果，特别适用于重载、大密度的电气化干线。

dianli qianyin AT suo

电力牵引AT所 (AT post for electric traction) 电力牵引AT供电方式专有，牵引网内设置自耦变压器的场所，简称AT所，又称自耦变压器所。AT所是AT供电方式牵引网的重要组成部分。将AT所自耦变压器（AT）按一定间隔距离跨接在牵引网的接触网、正馈线和钢轨间（见图1），起支撑2×25kV馈电系统的作用。

图1 牵引网构成

T—接触网；F—正馈线；R—钢轨；SS—牵引变电所；AT1～AT4—自耦变压器；ATP—AT所；SP—分区所

AT所间隔距离的选择对牵引网多项技术经济指标有重要影响。

间隔距离大，AT段中附加阻抗也大，造成牵引网电压损失和电能损失增加。间距增大时，牵引负荷按25kV直接供电方式运行的概率和区段长度也相应增加，使AT牵引网防止对通信线干扰影响的能力下降。

AT所安装容量与AT间距密切相关，适当选择AT所的容量是牵引供电系统设计的一项重要任务。

AT所对2×25kV馈电系统的支撑作用在于拓展牵引网按2×25kV方式运行的长度。图1中如果只在牵引网两端设置AT，当图中的机车取流时，整个牵引网基本上都是按25kV直接供电方式工作的，但增设AT所后，相当于把2×25kV馈电系统延伸至AT3，只是在最后一个AT段才部分地按直接供电方式运行。AT所的存在增强了AT牵引网的供电能力，使变电所间的距离得以放大，以利降低变电所及外部电源的造价。但AT所也不宜设置过密，适当的AT间距约为10km。

AT容量选择　由于AT牵引网和自耦变压器漏抗较小，当电源的短路容量较大时，AT短路电流可达极高数值。因此AT的安装容量除了应满足牵引负荷需要外，还应经得住短路电流的冲击。AT容量的选择分两种情况：

（1）对于设置在牵引变电所及其附近的AT，可按系统最大短路电流考虑

$$W \geq \frac{I_k}{2} U_N \frac{1}{K} \qquad (1)$$

式中W为自耦变压器的电磁容量，kV·A；I_k为换算至牵引母线电压的牵引网短路电流，A；U_N为自耦变压器额定电压，kV；K为自耦变压器允许短路电流倍数。日本电气学会（JEC）制定的电气化铁道专用AT的允许短路电流倍数$K=25$。

I_k值可由下式求出，即

$$I_k = \frac{U_N}{Z_S + Z_T + Z_k} \qquad (2)$$

式中Z_S为换算至牵引母线电压的电源阻抗，Ω；Z_T为牵引变压器阻抗，Ω；Z_k为牵引网短路阻抗，Ω。

（2）对于其他场所的AT，则可按最大工作电流求定，即

$$W \geq \frac{1}{2} U_N I_m \frac{1}{K_L} = \frac{1}{5} U_N I_m \qquad (3)$$

式中I_m为通过AT的最大负荷电流，A；K_L为AT短时（2min）允许过负荷系数（JEC标准为300%，计算中考虑一定裕度后可取为250%）。

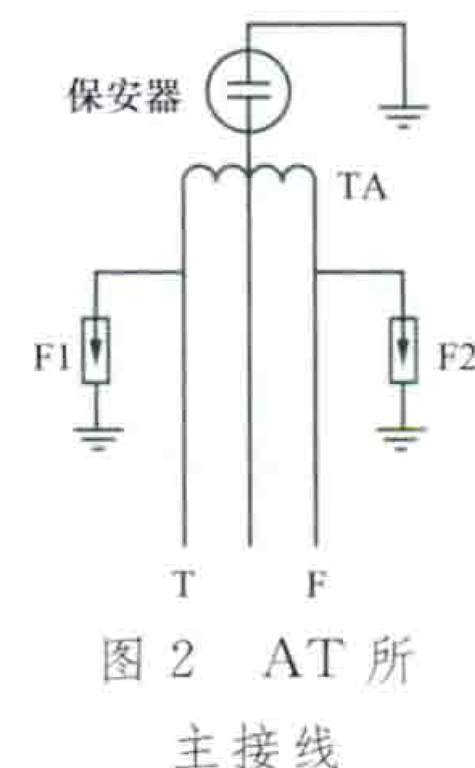


图2 AT所主接线

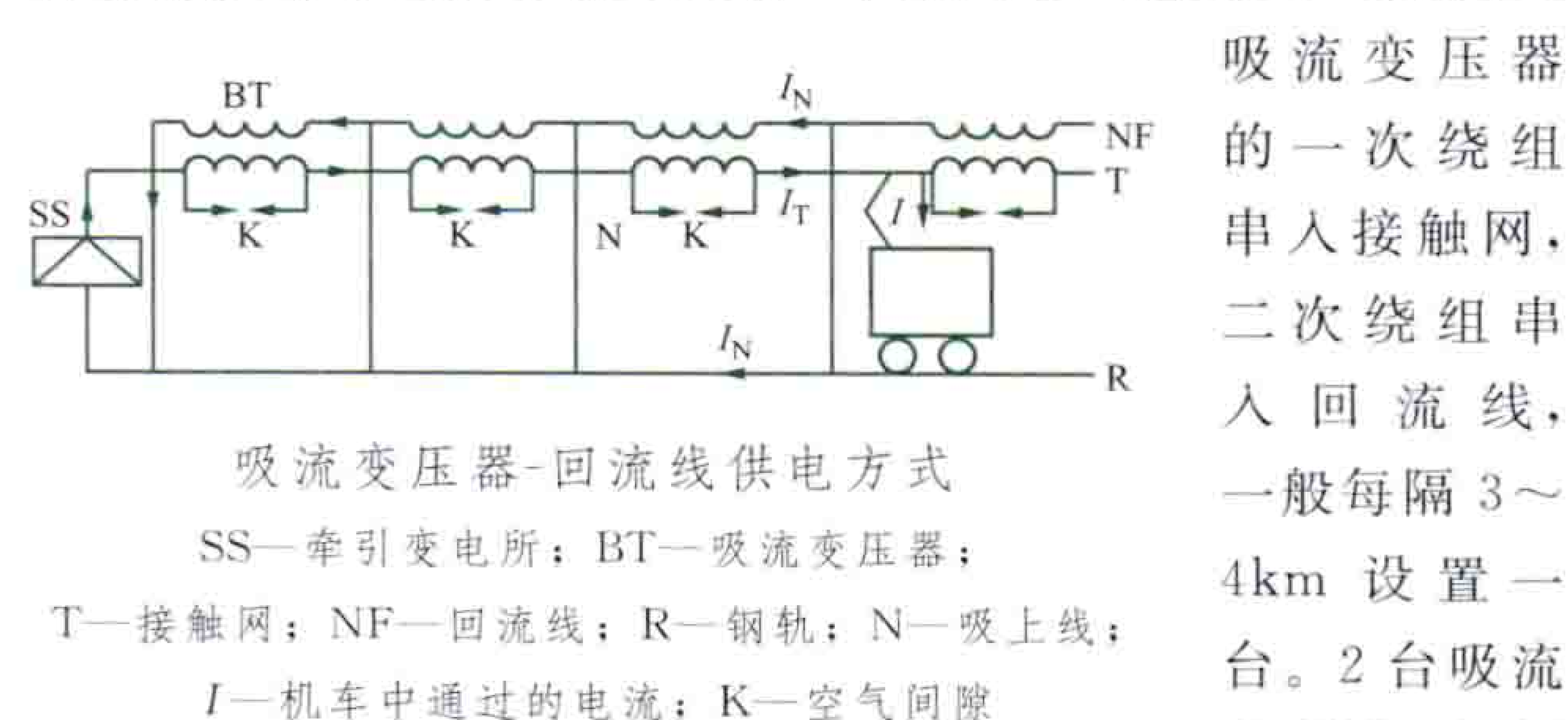
AT所主接线　容量在10000kV·A以下的AT所可不设断路器，具体接线见图2。图中F1、F2为避雷器，T、F分别为AT牵引网的接触网与正馈线。

dianli qianyin BT gongdian fangshi

电力牵引BT供电方式 (booster transformer supply system of electric traction) 为减轻单相工频交流电气化铁路对通信线路的干扰（见交流牵引网对通信线路的影响）而采用的一种带有吸流变压器（BT）的电力牵引供电方式。BT供电方式是减轻单相工频交流牵引负荷对通信线路干扰的有效手段，已在许多国家采用。但由于其结构复杂，对电力牵引供电系统技术经济指标的负面影响较大，随着电气化铁路向重载、高速、大密度运营模式发展，这种供电方式的使用受到限制。

分类　有吸流变压器-回流线及吸流变压器-钢轨两种结构形式。

吸流变压器-回流线供电方式　这种供电方式的专用设备有沿铁路设置的吸流变压器、回流线及吸上线等（见图）。



吸流变压器-回流线供电方式

SS—牵引变电所；BT—吸流变压器；T—接触网；NF—回流线；R—钢轨；N—吸上线；I—机车中通过的电流；K—空气间隙

吸流变压器的一次绕组串入接触网，二次绕组串入回流线，一般每隔3～4km设置一台。2台吸流变压器之间设吸上线，一端接钢轨或扼流变压器的中性点，另一端接回流线。由电力牵引变电所送出的牵引电流，经吸流变压器一次绕组、接触网送到电力机车，然后由钢轨、吸上线、回流线、吸流变压器二次绕组返回变电所。由于吸流变压器是按低励磁电流设计的，而且一、二次绕组匝数比为1∶1，所以回流线电流I_N与接触网电流I_T接近相等，相位则相差180°。这种供电方式的特点有：

（1）对通信线路干扰有良好的防护效果。因接触网、回流线与通信线路的相对位置接近，两者电流大小近似相等、方向相反，在通信线路上产生的感应电压大部分被抵消。

（2）钢轨泄漏电流小，对地电位小，利于安全。

（3）接触网中串入吸流变压器，牵引网阻抗加大，电压损失和能耗损失增加，供电质量降低。

（4）在吸流变压器处，接触网设有空气间隙。当电力机

车通过时，受电弓瞬间将吸流变压器一次绕组短接，容易产生电弧烧伤接触线，使接触网工作条件恶化。

吸流变压器-钢轨供电方式　利用钢轨作回流导线的吸流变压器供电方式。此时吸流变压器的一次绕组串入接触网，二次绕组串入钢轨。在吸流变压器处接触网设空气间隙，钢轨设绝缘轨缝。这种供电方式造价较低，但由于钢轨铺设在地面上，轨缝间的电位差容易对人身安全构成危险，而且在列车通过绝缘轨缝时，短时将吸流变压器短接，降低了对通信线路干扰的防护效果。

对牵引供电系统的影响　BT供电方式虽有极佳的防止对通信线路干扰影响的能力，但它对牵引供电系统本身的负面影响不可低估：

(1) 增加了大量吸流变压器和回流线等设备、材料，加大了牵引供电系统的投资。

(2) 吸流变压器分散设置在铁路区间沿线，缺乏安全保护，特别是对接触网（见电气化铁路接触网）频繁分段使硬点增多。当机车受电弓通过这些接触网电分段时可造成吸流变压器一次绕组瞬间短接，出现的巨大电弧可烧伤接触线和受电弓滑板，降低了接触网的可靠性。

(3) 牵引网单位阻抗显著增加，造成网内电压损失和电能损耗相应增加，加大了电气化铁路的运营成本。牵引网电压损失增加，也使牵引变电所的供电范围缩小，需要修建更多的牵引变电所，加大了建设费用。

dianli qianyin biandiansuo

电力牵引变电所　(substation of electric traction)

将电力系统电源变换成适合电气列车直接应用的电流、电压形式的设施，简称牵引变电所。根据电气化铁路采用的电流制式，牵引变电所（见图1）可分为直流、低频交流及工频交流3种类型。直流牵引变电所具有降压和整流两种功能，主要设备有降压变压器及整流装置，用于直流制电气化铁路、矿山铁路、城市无轨电车及地下铁道。低频交流牵引变电所具有降压和变频两种功能，主要设备有降压变压器及变频设备。电力系统的三相工频交流电，经降压并将工频变换成25Hz或$16\frac{2}{3}$Hz，供电力机车或电动车组使用。这种牵引变电所在西欧一些国家（德国、瑞士、瑞典等）得到采用。工频交流牵引变电所的主要功能是降压，主要设备是降压变压器，常称主变压器。



图1　电力牵引变电所实景

按照主变压器接线方式的不同，工频交流牵引变电所分为单相牵引变电所、三相牵引变电所及三相-二相牵引变电所。

单相牵引变电所　主变压器采用特殊设计的全绝缘单相变压器，一般每个变电所设2台。单相牵引变电所如图2所示，主变压器一次绕组接入系统的两相，二次绕组一端接接触网，另一端接钢轨。由于2台主变压器接法完全相同，所以这种牵引变电所又称为全并联接线牵引变电所。单相牵引变电所的主要特点：结构简单，维修方便；主变压器容量利用充分；负序电流较大，负序电流系数$K_i=\frac{I_{A2}}{I_{A1}}=1$，不能提供三相电源。这种变电所适用于能提供可靠三相电力电源的地区。

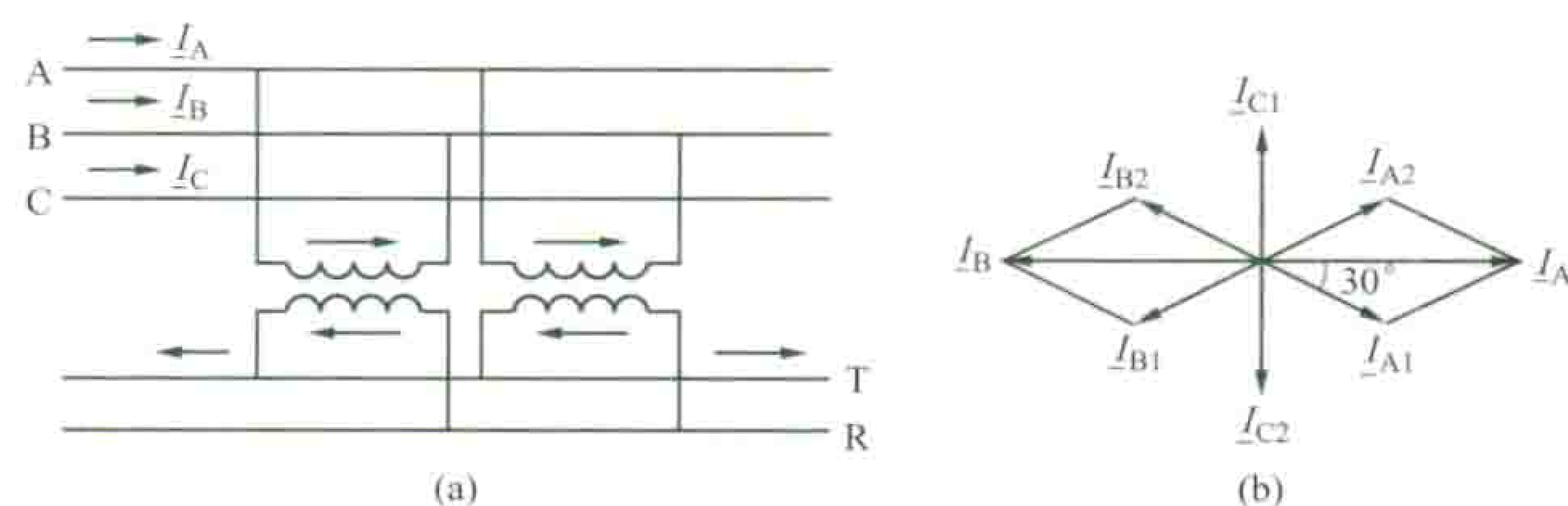


图2　单相牵引变电所

(a) 主变压器接线图；(b) 电流相量图

T—接触网；R—钢轨；$\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$—A、B相电流；

$\dot{I}_{A1}$、$\dot{I}_{B1}$、$\dot{I}_{C1}$—A、B、C相正序电流；

$\dot{I}_{A2}$、$\dot{I}_{B2}$、$\dot{I}_{C2}$—A、B、C相负序电流

三相牵引变电所　如图3所示，主变压器采用三相变压器，接线方式为Yd11。每个变电所设2台。其一次绕组接入电力系统的三相，二次绕组两个端子分别接不同分段的接触网，另一端子接钢轨。三相牵引变电所的主要特点：主变压器为普通三相电力变压器，能提供可靠的三相电源供变电所自用；负序电流较小，负序电流系数$K_i=0.5$；三相绕组电流分配不匀，容量利用不够充分。

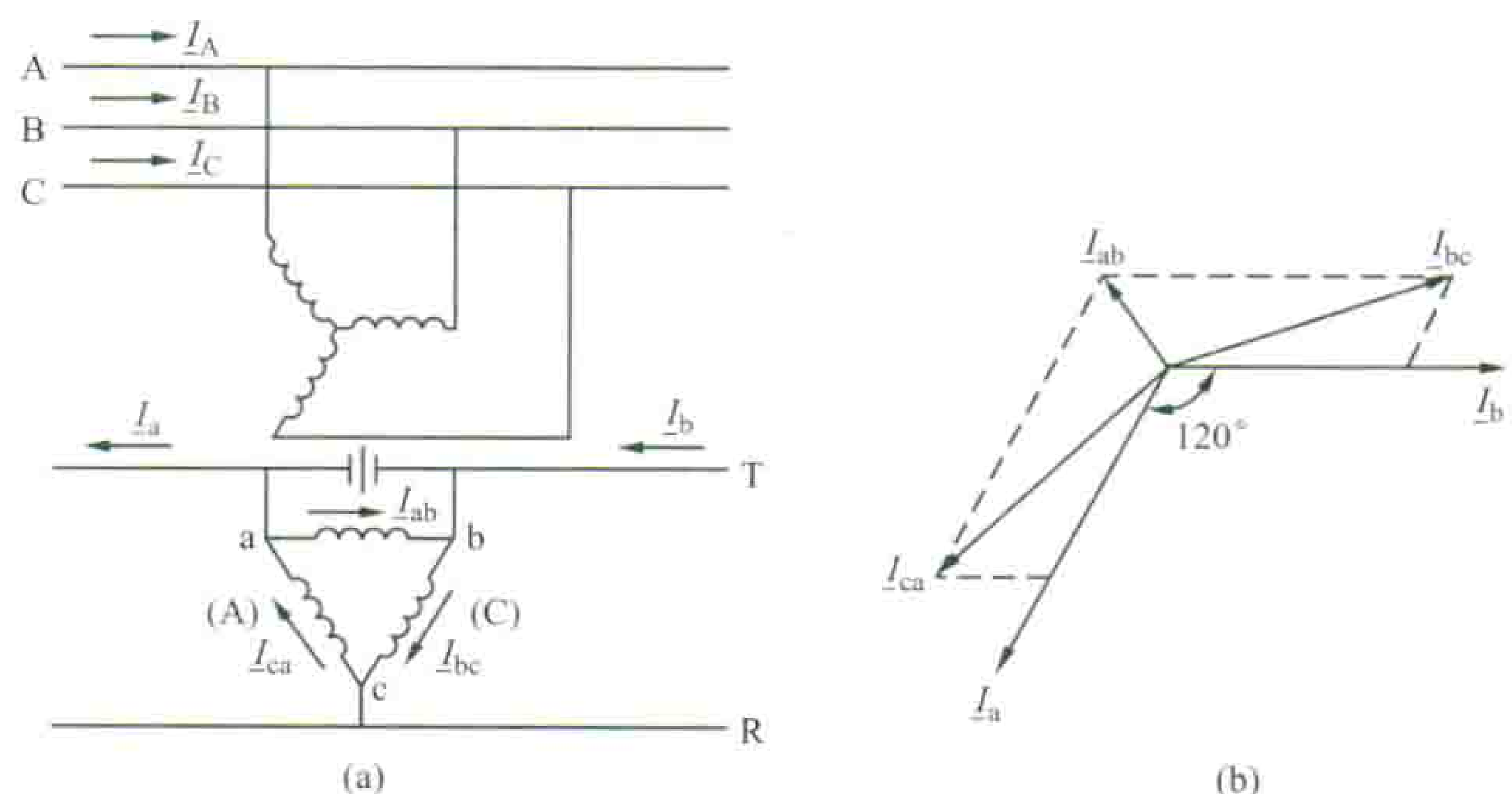


图3　三相牵引变电所

(a) 主变压器接线图；(b) 电流相量图（$\dot{I}_a=\dot{I}_b$时）

V接线牵引变电所属三相牵引变电所，如图4所示，2台主变压器的一、二次绕组均连成V形，一次侧接入系统的三相，二次侧两端分别接入不同的接触网分段，公共端接钢轨。V接线牵引变电所的主要特点：负序电流较小，负序电流系数$K_i=0.5$；主变压器容量利用比较充分；能提供三相电源供变电所自用；但一台主变压器停电时，三相电源即告中断，因而工作可靠性差，而且此时一台主变压器需实行跨相供电，要进行倒闸作业，操作比较麻烦。

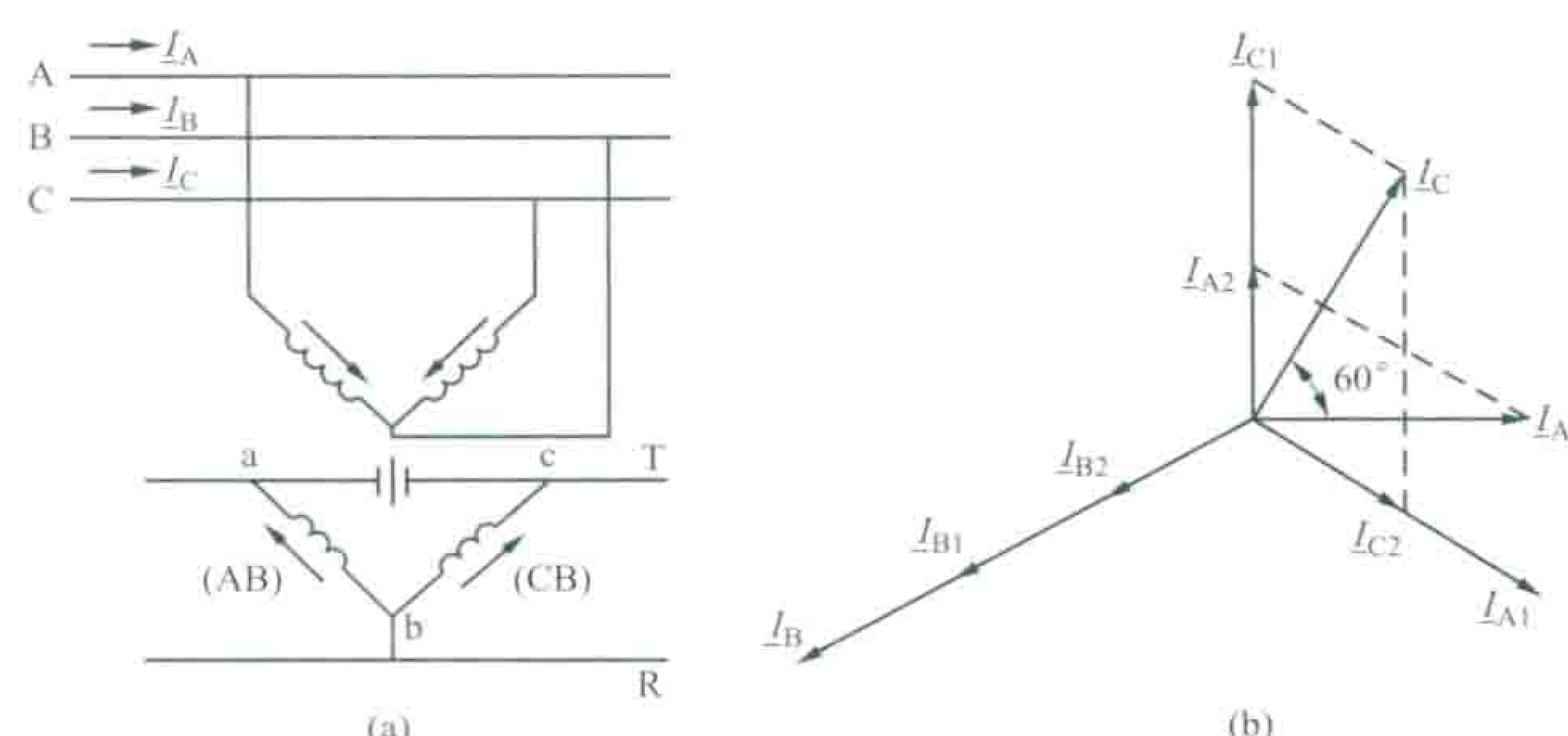


图 4　V 接线牵引变电所

（a）主变压器接线图；（b）电流相量图

三相-二相牵引变电所　主变压器能实现一次侧三相、二次侧两相负荷对称变换的牵引变电所。能实现这种变换的变压器接线方式很多，主要有斯科特（Scott）接线及伍德桥（或伍德布里奇）（Wood bridge）接线。

三相-二相牵引变电所的显著特点是能改善牵引变电所三相电流的平衡条件。在 AT 供电区段（见电力牵引 AT 供电方式），由于馈电臂长，负荷大，负序电流影响比较突出，因而，这种变电所得到广泛采用。

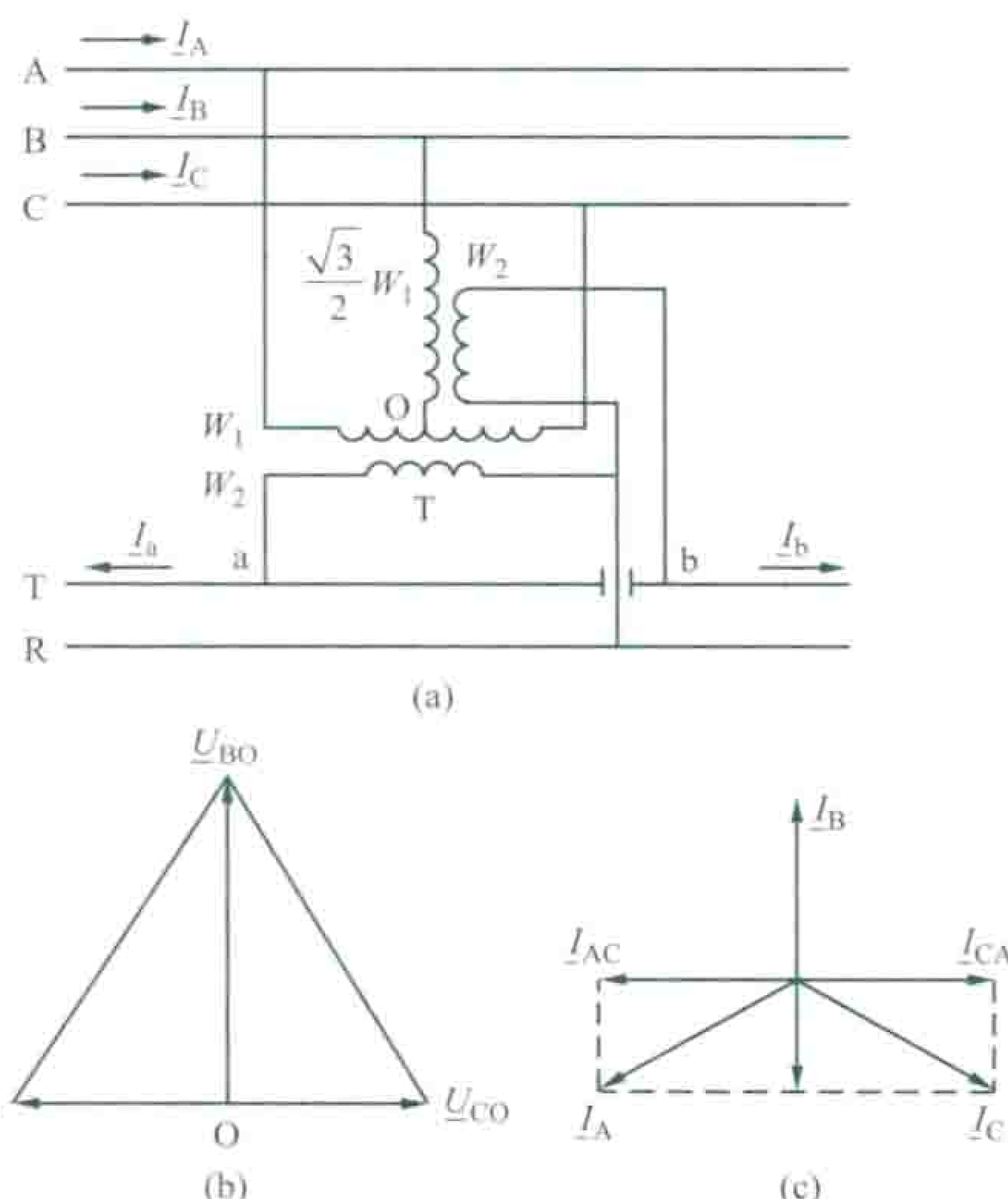


图 5　斯科特接线变电所

（a）主变压器接线图；（b）电压相量图；（c）电流相量图

斯科特接线变电所　如图 5 所示，变压器一次绕组接成 T 形，接入系统的三相；二次绕组为两个单相绕组，分别向不同的接触网分段供电。一次绕组匝数 AC 为 W_1、BO 为 $\sqrt{3}\ W_1/2$；二次绕组匝数均为 W_2。当馈电臂电流 $I_a=I_b=I$ 时，则 $I_A=I_B=I_C=\frac{2}{\sqrt{3}}\times\frac{W_2}{W_1}I$，相位关系如图 5（c）所示。可见，此时一次侧三相负荷实现了平衡。

伍德桥接线变电所　如图 6 所示。变压器一次为对称三相星形接线，其中性点可抽出接地；二次有两个三角形绕组背对背接成菱形，菱形的两轴分别供给牵引变电所的两个供电臂，由于两轴的电压不等，因此需在短轴上增设一台单相自耦变压器，将电压升至与长轴相等。与斯科特接线变压器相比，伍德桥接线变压器由于高压侧中性点可抽出接地，其绝缘可按半绝缘设计，而斯科特接线变压器一次绕组无法抽出中性点，其绝缘必须按全绝缘考虑。

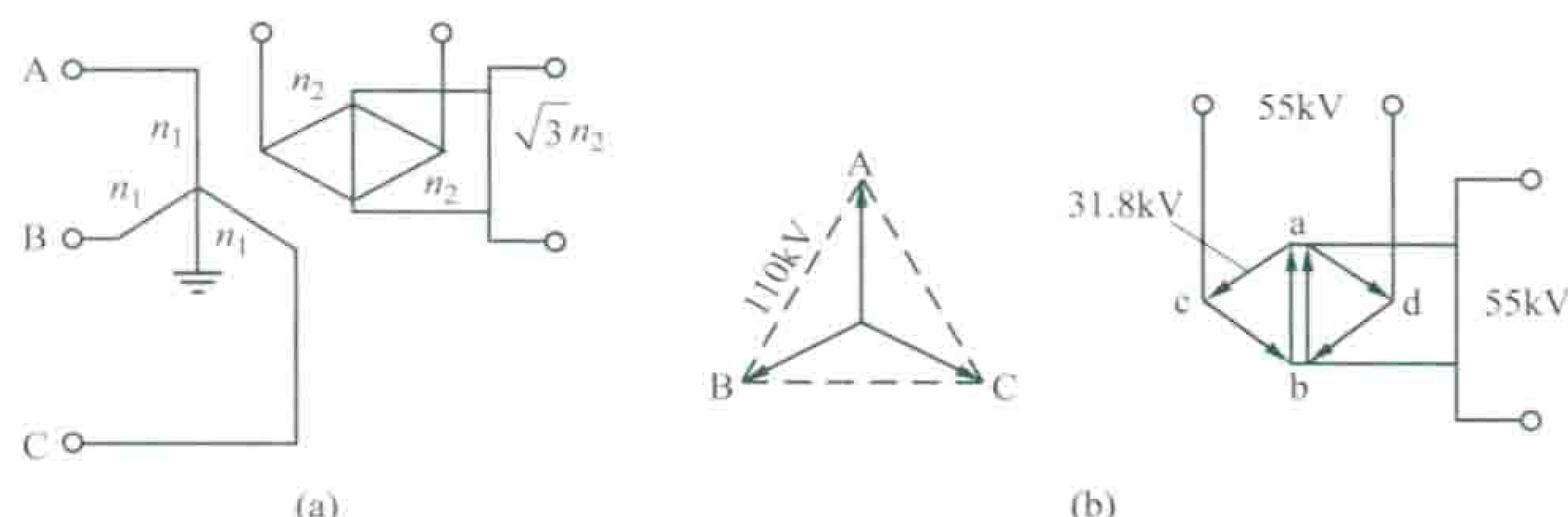


图 6　伍德桥接线变电所

（a）主变压器接线图；（b）电压相量图

dianli qianyin CC gongdian fangshi

电力牵引 CC 供电方式　（coaxial cable supply system of electric traction）　利用同轴电缆供电的一种电力牵引供电方式，又称同轴电缆供电方式。同轴电缆（CC）是一种具有同轴心的内、外两层导体，内、外导体之间和外导体外部均包有绝缘层的特殊电缆，见图 1。同轴电缆可沿铁路埋设，也可架空悬挂在接触网支柱上，每隔 5～10km 为一个分区，其内导体作为馈电线，与接触导线相连接，外导体作为回流线与钢轨相连接，见图 2。在有机车运行的分区内，电流从接触导线两端流入机车，而在电源侧的其他分区内，绝大部分负荷电流将流经同轴电缆。当同轴电缆内、外导体电流相等、方向相反时，其外部磁场几乎等于零，对通信线路的感应影响很小。此外，CC 供电方式的牵引网电压损失和电能损耗很小，供电质量优良。但电缆的单位截面允许载流量远低于架空裸导线，加之接触导线的载流能力又得不到充分利用，致使 CC 供电方式对铜材的消耗量大，造价高。因此，该供电方式一般只用于局部架设架空线特别困难地区。日本东海道新干线的浜松町—大畸间（6km）和东北新干线的上野—新田端间（2.4km），以及中国神头电厂的电气化专用线上（4km）都曾采用过这种供电方式。

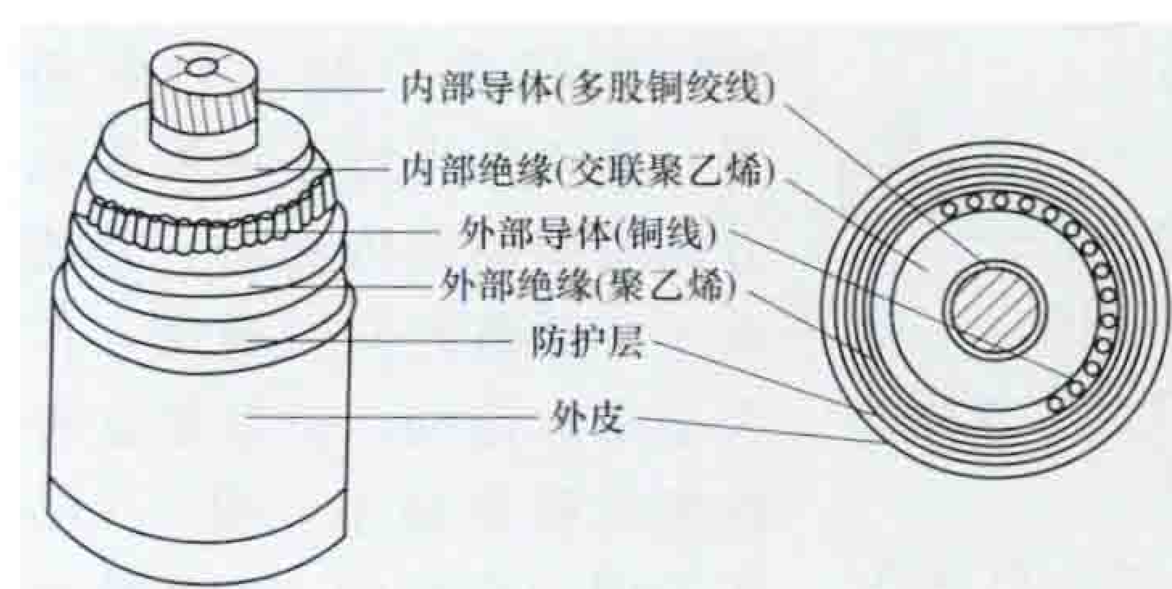


图 1　同轴电缆结构示意图

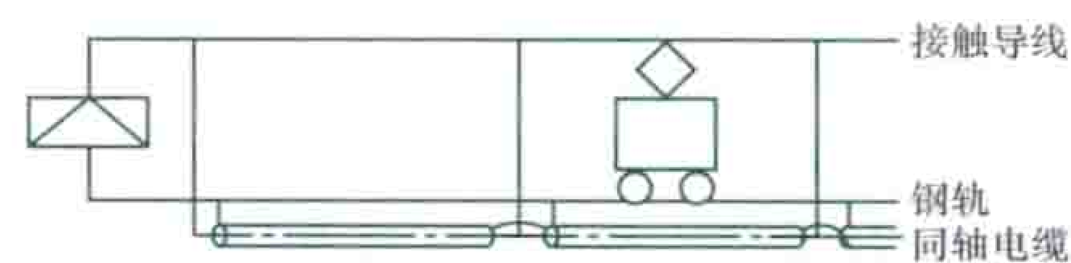


图 2　同轴电缆供电系统原理接线图

dianli qianyin fenqusuo

电力牵引分区所　（sectioning post for electric traction）

将牵引网分割成不同供电分区的设施。它通常设在两相邻电力牵引变电所的供电分界处。分区所的主要作用为：①明确各牵引变电所的供电范围，并在供电分界处接触网上设绝缘分段，防止电力机车从一个供电分区进入另一供电分区时，其受电弓短时连通不同供电分区接触网（见电气化铁路接触网）造成相间短路事故。②实现牵引网不同运行方式的切换、倒闸。在单线区段，牵引网可实现单边供电、并联供电或越区供电等方式；在复线区段则有单边分开供电，单线双边供电，复线纽结供电，复线上、下行在分区所一点并联供电及越区供电等方式。③缩小牵引网事故范围。④降低牵引网电压损失和电能损失，提高电力牵引供电系统效率。

直流牵引系统接触网全线电气联通，不设置分区所；交流电气化铁路需设置分区所。

单线分区所接线十分简单，在相邻供电分区间串联接入一断路器即可。复线分区所则有上、下行接触网并联供电及纽结供电等形式。图1为复线上、下行接触网并联分区所接线，图2为复线纽结分区所接线。其中图2（a）所示放射式接线的优点是继电保护简单，切断故障区段仅需分断一台断路器；缺点是当短路点发生在分区所断路器内侧时，将造成4台断路器同时跳闸，扩大了事故范围，但发生这种故障的概率极小。图2（b）所示四边形接线，在切除故障区段时需同时切断2台断路器，且继电保护也较复杂。

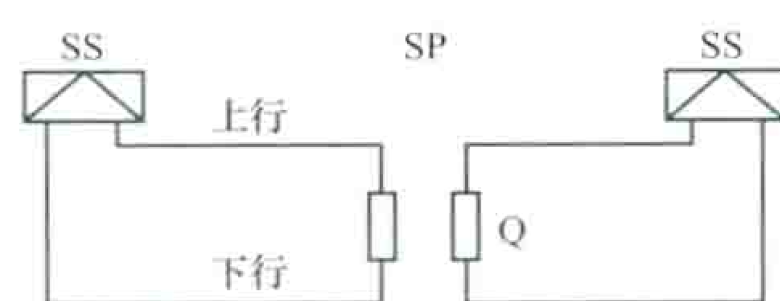


图1 复线上、下行接触网并联分区所接线
SS—牵引变电所；SP—分区所；Q—断路器

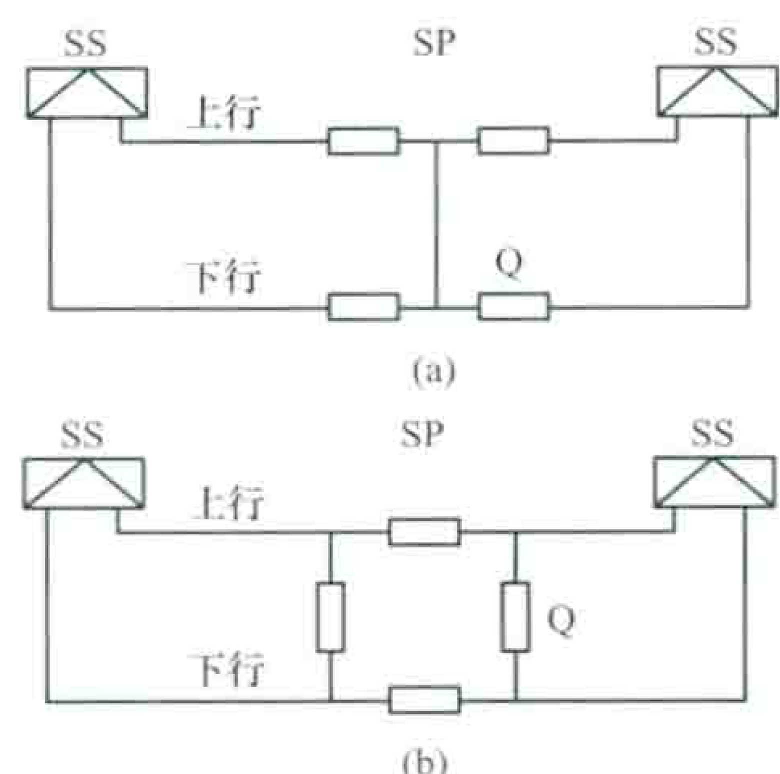


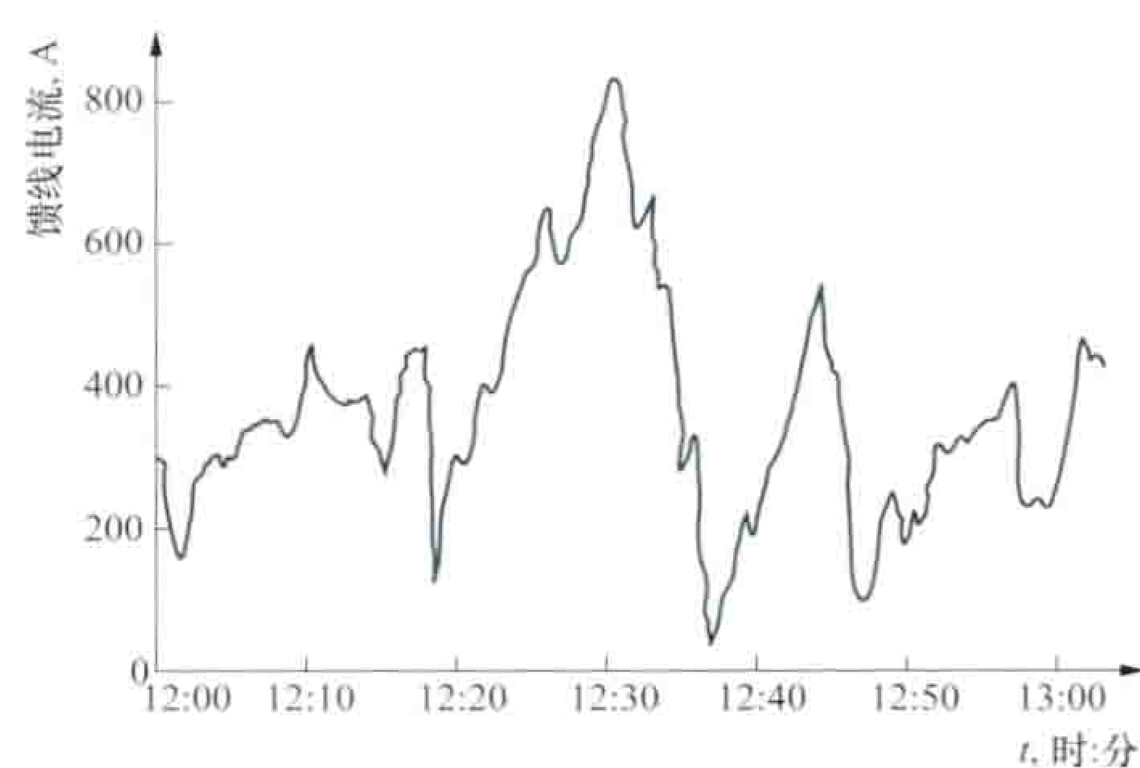
图2 复线纽结分区所接线
(a) 放射式接线；(b) 四边形接线
SS—牵引变电所；SP—分区所；Q—断路器

dianli qianyin fuhe tezheng

电力牵引负荷特征 (features of electric traction)

对电力牵引负荷特点的描述。电力牵引负荷是指电力机车运行时所需要的电功率。电力牵引负荷的特征为：负荷波动幅度大，且具有随机性；产生负序电流、迷散电流和高次谐波；功率因数低等。

电力牵引用电设备为沿铁路运行的电力机车。由于电力机车的数量、位置、取流大小（与线路坡道及弯道、牵引重量、运行速度、行车密度等有关）是不断变化的，因而负荷具有明显的波动性和间歇性。图中示出了某电力牵引变电所的负荷曲线。



电力牵引变电所负荷曲线

电气化铁路的牵引供电网络以钢轨作为负荷电流的回归导体。直接铺设在地面上的铁路钢轨与大地间没有良好的绝缘，一部分牵引回流自机车车轮接触的钢轨处开始向两侧通过轨-地间的横向过渡电阻逐渐泄入大地，并在电力牵引变电所附近逐渐由地中返回钢轨，使接触网-钢轨回路成为不平衡馈电电路。对于交流电气化铁路，由钢轨泄入地中的电流将对平行接近的通信线路产生危险感应电压；对于直流电气化铁路，由钢轨泄入地中的直流电流（称迷散电流）在地中广大范围内流通，并对地中埋设的金属供水管道、燃气或输油管道、铠装电缆外皮以及其他金属建筑物产生电解作用，造成金属管路穿孔或电蚀。交流电气化铁路的地中电流对地下金属建筑物的电蚀作用很小。（见电力牵引迷散电流）

交流电气化铁路一般均采用整流式电力机车。整流过程中产生的各奇数高次谐波电流可使交流侧的电流、电压波形发生较大畸变。波形畸变对邻近平行接近的音频通信线路将产生杂音干扰，而对电力系统发电设备和其他电力用电设备带来附加损耗。（见电力牵引高次谐波）

由于交流电力机车为单相负荷，使电力牵引变电所电源侧的三相电流出现不平衡，从而对三相对称的公用电力系统产生有害的负序电流和负序电压影响。（见交流电气化铁路的负序影响）

在有长、大坡道的电气化铁路上，有时为了节约电力也采用再生制动电力机车。在单相工频制电气化铁路上采用再生制动电力机车，将使电力牵引变电所的平均功率因数恶化，使电气化铁路对电力系统产生的负序电流影响增大。（见电力牵引功率因数）

dianli qianyin gaoci xiebo

电力牵引高次谐波 (harmonics of electric traction)

整流式交流电力机车在整流过程中将引起交流侧电流、电压波形畸变，按傅里叶级数分析该畸变波形可分解成频率为基波频率整数倍的一系列高次谐波分量的叠加。高次谐波电流、电压可引起的不良影响有：①对通信线路产生杂音干扰；②引起电力系统中其他电力电容器设备的过负荷；③当电气化铁路负荷某次谐波电流频率与电力系统自身谐振频率相近时，可产生电流谐振，使该次谐波电流在电力系统中放大，危及电力系统安全运行；④使旋转电机、变压器、电力电缆的出力减少并产生过热，影响电气设备寿命；⑤造成继电保护误动或仪表读数误差；⑥使半导体开关元件换相失灵。

为限制谐波的危害，各国都规定了允许谐波含量的标准。为降低电力牵引负荷产生的谐波，在电力牵引变电所和部分交直电力机车中可装设由电容、电感组成的谐波吸收装置。交流-直流-交流电力机车和动车组利用电力电子技术，可实现低谐波分量的负荷特性，使谐波含量降低。

dianli qianyin gonglü yinshu

电力牵引功率因数 (power factor of electric traction)

电力牵引变电所有功功率与视在功率之比。交流电气化铁路整流式电力机车在接近满负荷条件下的功率因数在0.82～0.85之间，在轻负荷条件下，其功率因数会急剧恶化。此外，在传递牵引功率过程中，牵引网和电力牵引变电所的主变压器也需消耗相当数量的无功功率，归算到电力牵引变电所高压侧的平均功率因数通常在0.76～0.78之间。

交流负荷功率因数低将引起的不良影响有：

（1）造成输变电回路中电压损失增加，电压损失通常可按下式计算，即

$$\Delta U = I(R\cos\varphi + X\sin\varphi)$$

式中 I 为负荷电流；R 为输变电回路阻抗的电阻分量；X 为输变电回路阻抗的电抗分量；φ 为负荷的功率因数角。

在高压输电网络中，回路阻抗的电阻分量较之电抗分量小，故常可忽略，使得回路电压损失近似与电抗分量和负荷功率因数角的正弦值的乘积成比例。当负荷功率因数变差

时，电压损失将显著增加。

(2) 造成发电、输电、变电和供电各个环节设备容量的增加，在输送同一有功功率时，总视在功率随负荷功率因数下降而增加。

(3) 加大了各供电环节在输变电过程中的损耗。

(4) 造成电力系统其他用户电气设备的过载、出力不足和额外损耗。

电力牵引负荷的无功补偿方法　一般电力牵引负荷的无功补偿与牵引电流的谐波补偿结合进行。

在电力机车上加装 L-C 谐波和无功综合补偿装置。这种方式的优点是，直接在用电端进行补偿，补偿效果好，可以从根本上消除谐波电流对通信线路的杂音干扰影响，而且在输变电回路中的电压质量较好，电力损耗较小，需要的供电设备容量较小；缺点是分散补偿，补偿装置的容量利用率较低。

在变电所牵引母线上加装 L-C 谐波和无功综合补偿装置。这种方式在牵引网中仍有谐波电流流通，牵引网电压水平较差，对邻近架空通信线路的杂音干扰较大；但由于实行相对集中补偿，装置的利用率和安装费用较低。

在牵引变电所加装串联电容器、L-C 谐波和无功综合补偿装置，见图 1。

图 1　牵引变电所加装串联电容器、L-C 谐波和无功综合补偿装置示意图

设置串联电容器的目的是在重负荷条件下，改善回路电压水平，并兼有增加无功出力的作用。电气化铁路牵引负荷波动性大，如果按重负荷条件选择并联电容器的补偿容量，则在轻负荷时将产生大量多余无功功率，并向电力系统返送，而串联电容器的无功出力恰恰具有随负荷大小自动调整无功输出的能力。

电力牵引负荷无功补偿装置计算　综合补偿装置各项参数的计算式汇总列于表。

补偿装置各项参数的计算

补偿装置	参数名称	计算式	计算图
电容器	端子电压 U_C	$U_C = \frac{1}{1-\alpha}U$	
	无功容量 Q_{CC}	$Q_{CC} = \frac{1}{1-\alpha}Q_C$	
	容抗 X_C	$X_C = \frac{1}{1-\alpha} \times \frac{U^2}{Q_C}$	U; U_C; X_C, Q_{CC}; U_L; X_L, Q_L
电抗器	端子电压 U_L	$U_L = \frac{\alpha}{1-\alpha}U$	
	无功容量 Q_L	$Q_L = \frac{\alpha}{1-\alpha}Q_C$	
	容抗 X_L	$X_L = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times \frac{U^2}{Q_C}$	
综合补偿装置	输出无功容量 Q_C	$Q_C = Q_{CC} - Q_L$	
	电抗 Z_C	$Z_C = X_C - X_L$	
	电流 I_C	$I_C = Q_C/U$	

注：U—母线电压；Q_C—装置输出无功容量；$\alpha = \frac{X_L}{X_C}$。

通常，综合补偿装置的需要容量 Q_C 还可按下式计算，即

$$Q_C = P\left[\left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_1} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2\varphi_2} - 1}\right)K\right]$$

式中 $\cos\varphi_1$ 为补偿前的功率因数；$\cos\varphi_2$ 为补偿后的功率因数；P 为牵引负荷的平均有功功率，kV·A；K 为补偿装置的利用率。补偿装置利用率可根据用户的无功功率负荷曲线确定，见图 2。

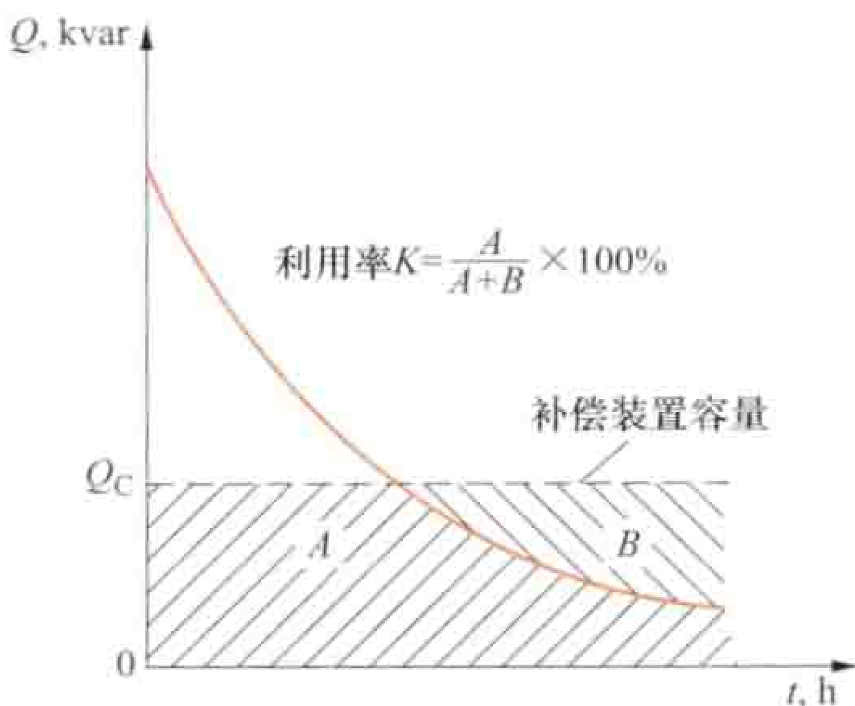


图 2　电力牵引负荷的无功功率-时间曲线

中国对用户无功补偿装置发生过补偿的情况做出了极严格的限制，规定在发生无功返送回电力系统的情况时，返送无功应视为消耗无功合并计算负荷的功率因数。这种情况下，采用固定并联无功补偿装置来提高功率因数，对运输繁忙的双线铁路补偿效果较好；对运量小的单线铁路，在负荷轻时过补比较严重，故采用动态补偿措施，可很好解决功率因数低的问题。客运专线采用交-直-交电动车组后，功率因数一般在 0.95 以上。

dianli qianyin gongdian fangshi

电力牵引供电方式

(power supply system for electric traction)　向牵引负荷提供电力供应的方法与形式。按电力牵引供电系统的设备和接线的不同，主要有直接供电方式、BT 供电方式、AT 供电方式及 CC 供电方式。

直接供电方式结构简单、造价低、施工及维修方便，但在单相工频交流电气化铁路上，存在牵引负荷对通信线路的严重干扰，而且钢轨电位高，安全性较差。它主要用于直流电气化铁路及对通信线路干扰问题不突出地区的交流电气化铁路。（见电力牵引直接供电方式）

BT 供电方式对通信干扰有良好的防护效果，钢轨电位较低；但供电质量差，结构复杂，当行车速度高、牵引负荷大时容易烧毁接触网。它主要用于通信干扰严重地区的单相工频交流电气化铁路。（见电力牵引 BT 供电方式）

AT 供电方式能大大减少对通信线路的干扰，供电容量大、质量高，钢轨电位低；但牵引网结构复杂，对桥隧建筑物的净空要求高。在列车密度大、牵引重载列车的电气化区段，AT 供电方式效果更佳。（见电力牵引 AT 供电方式）

CC 供电方式具有结构简单、净空要求低、对通信不会造成干扰等特点，但价格昂贵，只适合在一些特殊地段采用。（见电力牵引 CC 供电方式）

dianli qianyin gongdian jisuan

电力牵引供电计算

(electric calculations for electric traction)　为确定电气化铁路牵引供电系统一系列重要技术参数而进行的一整套计算。包括牵引供电设备需要容量计算、牵引网阻抗计算、牵引供电系统电压损失计算等。

牵引供电设备需要容量计算　由于牵引供电设备的负荷具有急剧变化的特点，使正确选定所需要的容量成为一项相

当复杂的工作。它不仅关系到电气化铁路技术经济指标的好坏，还直接影响到电气化铁路的安全、可靠运行。

常用的计算方法有平均行车量法、概率统计法和运行图法等。不同的方法对电气化铁路运行方式做出了不同的简化假设，因而它们的计算工作量和准确度也不同。

平均行车量法　把电力机车实际沿整个供电臂运行时不断变化的负荷看做是按某一平均电流用电的稳定负荷；把供电臂在不同时间内可能发生的紧密和稀疏运行情况看作某一平均列车数稳定运行的方式；将运行列车种类和牵引重量看做是同一类型的，从而使各列车的用电特性一致。这是一种忽略电力牵引负荷特征的简易计算方法。这种用平均负荷去代替剧烈波动负荷的做法往往使计算所得容量偏小，只有在供电臂供电范围及线路行车量较大的情况下，才能获得接近实际的结果。

概率统计法　假定线路运行列车种类和重量完全相同，考虑供电臂在不同时间可能发生的紧密运行情况，并按概率统计方法的最大数学期望值确定供电设备的需要容量。这种方法在很大程度上考虑了牵引负荷的特点，计算结果比较准确。

运行图法　以列车商务运行图为基础，根据列车牵引计算资料按一定时间间隔（如 1min）求出各时间断面的供电臂瞬时负荷并绘成负荷曲线，再根据负荷曲线求出均方根电流平均值或计算负荷电流值。运行图法是最直观、最准确的计算方法。

牵引网阻抗计算　工频单相牵引网阻抗计算可分成 25kV 直接供电（有吸流变压器和回流线装置者也可归入这一类）牵引网阻抗计算和 2×25kV 自耦变压器供电（AT 供电网络）牵引网阻抗计算两大类。

25kV 直接供电牵引网阻抗计算　按下列几种情况分别计算。

（1）牵引网单位阻抗按下式计算，即

$$Z_0 = Z_T - \frac{Z_{TR}^2}{Z_R} + \frac{(Z_R - Z_{TR})^2}{Z_R} \times \frac{\text{th}\dfrac{kl}{2}}{\dfrac{kl}{2}} \tag{1}$$

式中 Z_T 为接触悬挂-地回路自阻抗，Ω/km；Z_{TR} 为接触悬挂与钢轨间互阻抗，Ω/km；Z_R 为钢轨-地回路自阻抗，Ω/km；k 为钢轨回路传播常数，km^{-1}；l 为牵引网络长度，km。

（2）工频 50Hz 时，单根导线-地回路自阻抗可由下式计算，即

$$Z = R + 0.05 - j0.144 \times (1.42 + \lg D\sqrt{\sigma}) \tag{2}$$

式中 R 为导线有效电阻，Ω/km；D 为导线外径，cm；σ 为大地电导率，S/cm。

（3）两根导线裂相（承力索和接触线）-地回路自阻抗由下式计算，即

$$Z_T = \frac{Z_c Z_j - Z_{cj}^2}{Z_c + Z_j - 2Z_{cj}} \tag{3}$$

式中 Z_c 为承力索-地回路自阻抗，Ω/km；Z_j 为接触线-地回路自阻抗，Ω/km；Z_{cj} 为承力索与接触线间互阻抗，Ω/km。

（4）两根导线-地回路间的互阻抗按下式计算，即

$$Z_M = 0.5 - j0.144 \times (1.53 + \lg a\sqrt{\sigma}) \tag{4}$$

式中 a 为两导线间距离，cm。

（5）单根轨条-地回路的自阻抗按下式计算，即

$$Z'_R = r_{Ra} + 0.05 - j0.144 \times (1.53 - 5.2r_{Ra} + \lg R_R\sqrt{\sigma}) \tag{5}$$

式中 r_{Ra} 为轨条有效电阻，Ω/km；R_R 为轨条半径，cm。

（6）轨条为铁磁物质，其有效电阻随通过电流的频率和数值不同，有较大变化。单线铁路有两根轨条，其钢轨-地回路自阻抗按下式计算，即

$$Z_R = \frac{r_{Ra}}{2} + 0.05 - j0.144 \times \left(1.53 - 5.2 \times \frac{r_{Ra}}{2} + \lg\sqrt{R_R Q_R}\sqrt{\sigma}\right) \tag{6}$$

式中 Q_R 为轨距，中国取 143.5cm。

2×25kV 自耦变压器供电（AT 供电网络）牵引网阻抗计算　典型的 AT 供电网络如图 1 所示。与 25kV 直接供电方式不同，AT 供电方式的牵引网阻抗不是一种均布参数，它与网络长度间没有简单的线性关系。

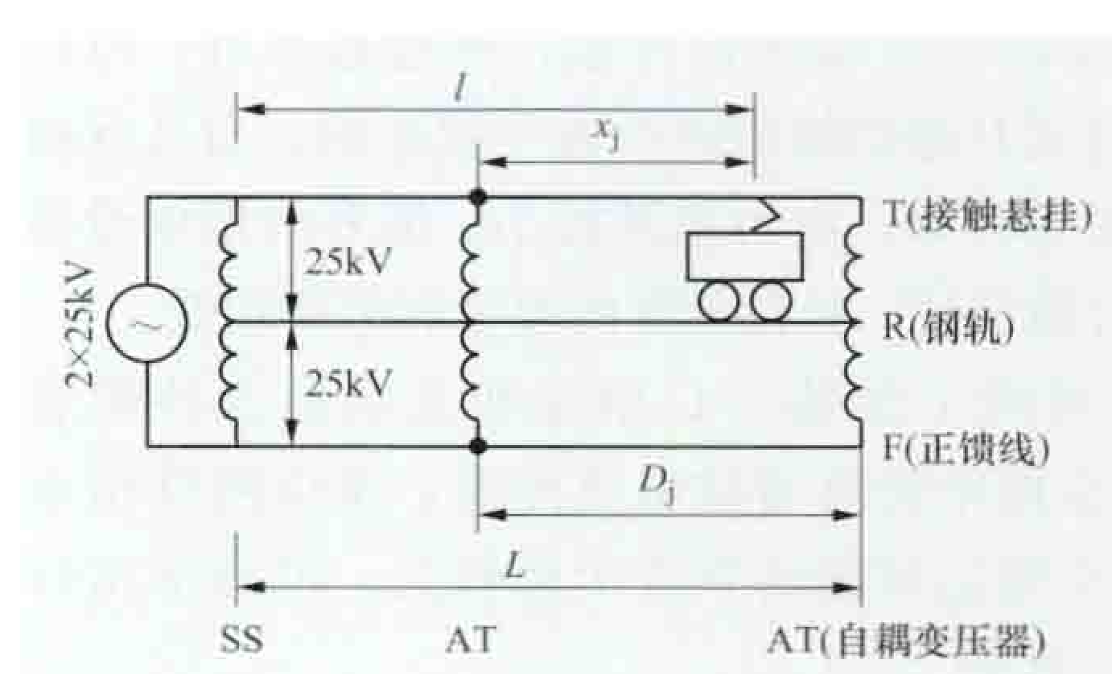


图 1　AT 供电网络示意图

单线 AT 供电网络的等值电路如图 2 所示。其阻抗分别为

$$Z_1 = \frac{1}{2}(Z_T + Z_{RF} - Z_{TR} - Z_{TF}) \tag{7}$$

$$Z_2 = Z_R + \frac{1}{2}(Z_T - 3Z_{TR} - Z_{RF} + Z_{TF}) \tag{8}$$

$$Z_3 = \frac{1}{4}(Z_F - Z_T) + \frac{1}{2}(Z_{TR} - Z_{RF}) \tag{9}$$

式中 Z_{RF} 为正馈线与钢轨间互阻抗，Ω/km；Z_F 为正馈线-地回路自阻抗，Ω/km；Z_{TF} 为接触悬挂与正馈线间互阻抗，Ω/km；Z_{TR} 为接触悬挂与钢轨间互阻抗，Ω/km。

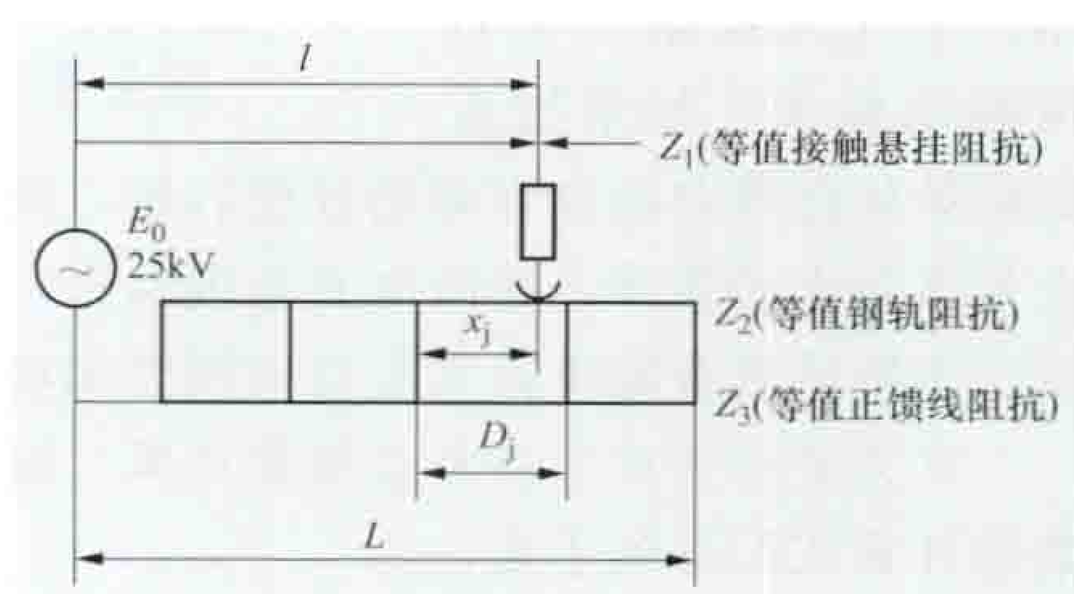


图 2　单线 AT 供电网络等值电路图

距变电所 l（km）处的 T-R 牵引网阻抗为

$$Z_n = Z_L l + Z'_L\left(1 - \frac{x_j}{D_j}\right)x_j \tag{10}$$

$$Z_L = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}$$

$$Z'_L = \frac{Z_2^2}{Z_2 + Z_3}$$

式中 x_j 为列车在 AT 段中距段首的长度，km；D_j 为列车所在 AT 段长度，km。

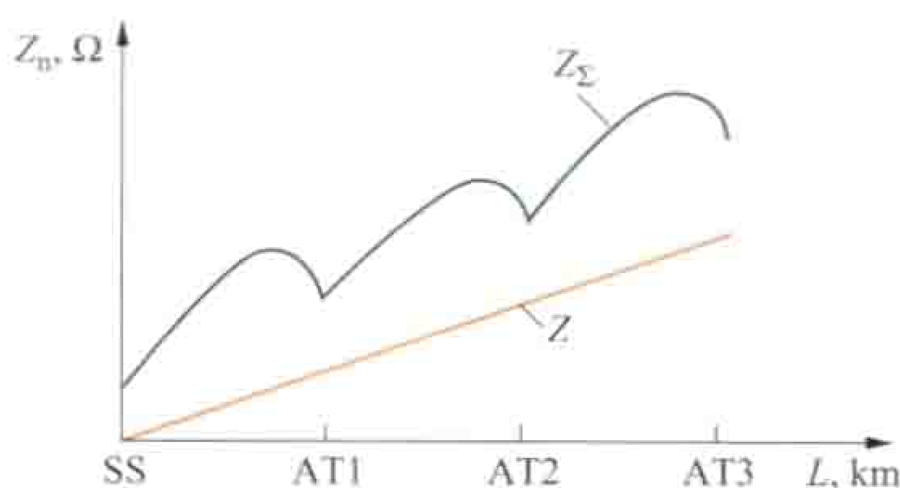


图 3　单线 AT 网络阻抗曲线

列车在网络中不同位置时与网络阻抗的关系曲线如图 3 所示。图 3 中 Z_Σ 为 T-R 牵引网总阻抗；Z 为 T-F 长回路阻抗。

在复线条件下，如

果上、下行AT供电网络通过分区所并联供电，则计算至负载端的网络综合阻抗为

$$Z_n = \frac{2L-l}{2L} l Z_L + Z'_L \left(1 - \frac{x_j}{D_j}\right) x_j \qquad (11)$$

式中 L 为供电臂长度，km。

牵引供电系统电压损失计算 牵引供电系统电压损失由两部分组成，即牵引变压器电压损失和牵引网电压损失。

牵引变压器电压损失 单相接线、三相V接线及三相-二相平衡接线的牵引变电所一相牵引母线中的电压损失只与该牵引母线的负荷有关，其值为

$$\Delta U_T = I(R_T \cos\varphi + X_T \sin\varphi) \qquad (12)$$

式中 R_T、X_T 分别为变压器的电阻和电抗，对于大型变压器，可忽略 R_T；φ 为负荷功率因数角。

主变压器为Yd接线的变电所一相牵引母线负荷可对另一相牵引母线电压产生影响，如图4所示。引前相牵引负荷电流 $\dot{I}_f$ 将部分地流过变压器滞后相绕组，而该电流相对于滞后相电压落后一个功率因数角 $\varphi_f+60°$，这引起滞后相牵引母线的额外的电压下降 ΔU_{bf}。相反，滞后相牵引电流 $\dot{I}_b$ 也部分地流过变压器引前相绕组，该电流超前于引前相电压 $60°-\varphi_b$，超前电流使引前相牵引母线产生额外的电压升高 ΔU_{bb}。计算式为

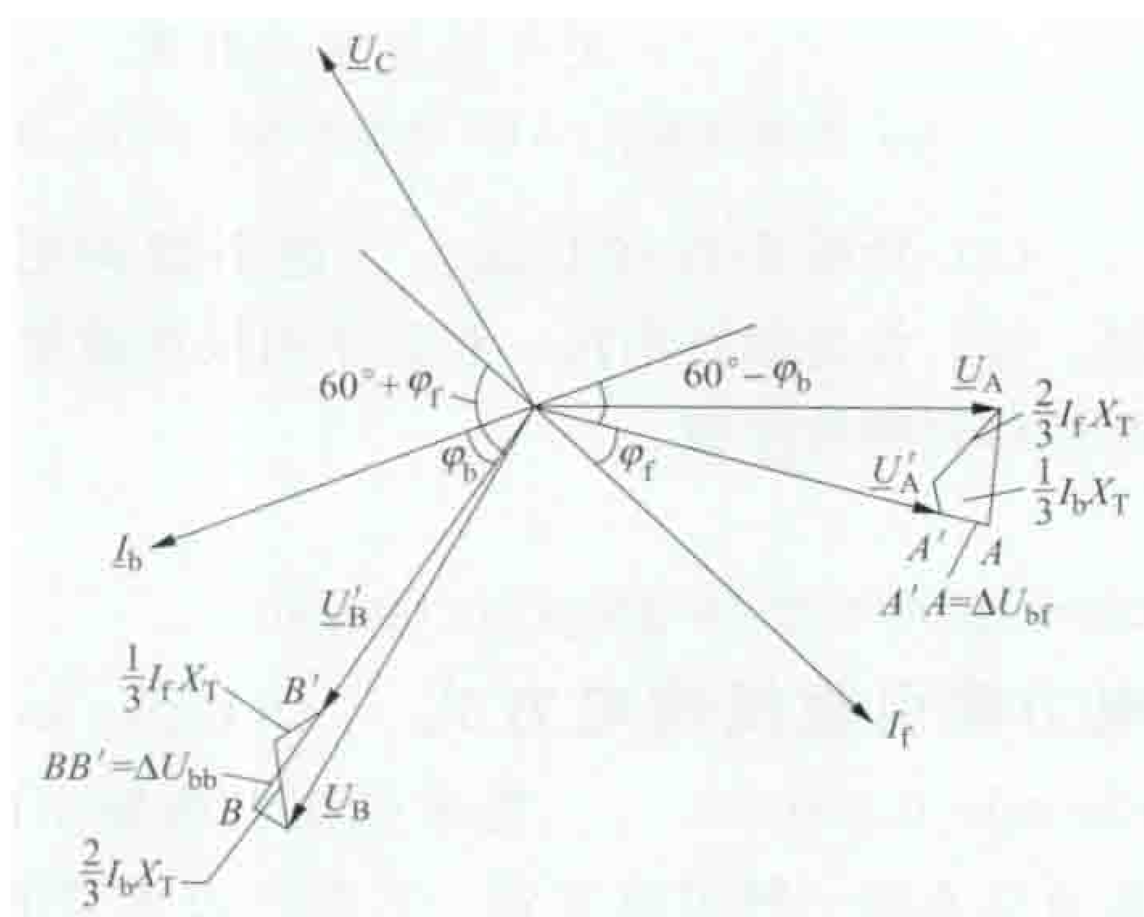


图4 变压器Yd接线的变电所母线电压损失相量图

$$\Delta U_{bf} = X_T\left[\frac{2}{3}I_f \sin\varphi_f - \frac{1}{3}I_b \sin(60°-\varphi_b)\right] \qquad (13)$$

$$\Delta U_{bb} = X_T\left[\frac{1}{3}I_f \sin(60°+\varphi_f) + \frac{2}{3}I_b \sin\varphi_b\right] \qquad (14)$$

式中 ΔU_{bf}、ΔU_{bb} 分别为引前相和滞后相牵引母线电压损失，V；I_f、I_b 分别为引前相和滞后相母线负荷电流，A；φ_f、φ_b 分别为引前相和滞后相负荷的功率因数角；X_T 为变压器电抗。

牵引网电压损失 不同电力牵引供电方式下网络中某指定电力机车受电弓上的电压损失计算公式见表。

牵引网电压损失计算表

供电方式	计算公式
直接供电方式	$\Delta U_k = (R\cos\varphi + X\sin\varphi)\left(\sum_1^j I_i l_i + l_j \sum_{j+1}^m I_i\right)$
AT供电方式	$\Delta U_k = (R_L\cos\varphi + X_L\sin\varphi)\left(\sum_1^j I_i l_i + l_j \sum_{j+1}^m I_i\right) + (R'_L\cos\varphi + X'_L\sin\varphi)\left(1-\frac{x_j}{D_j}\right)x_j I_j$
符号说明	R、X 分别为直供牵引网单位阻抗的电阻和电抗；R_L、X_L 分别为AT网络长回路阻抗的电阻和电抗；R'_L、X'_L 分别为AT供电网络列车在段中附加阻抗的电阻和电抗；j 为计算列车序号；$j+1 \sim m$ 为位于计算列车之后（面对变电所）的其他列车序号

dianli qianyin gongdian xitong

电力牵引供电系统 (power supply system of electric traction) 向电力机车或电动车组供电而设置的变电、馈电设施的总称。电力牵引供电系统一般由牵引变电所、牵引网、分区所、开闭所和电力牵引调度所等组成。

电力牵引供电系统与公用电力系统的产权分界点在牵引变电所高压进线的门型架处。通常，牵引变电所在变压后，将电力通过馈电线和接触网送到电力机车，牵引回流则经由钢轨—地回路（有时还有专门的回流线）返回牵引变电所（见图1）。

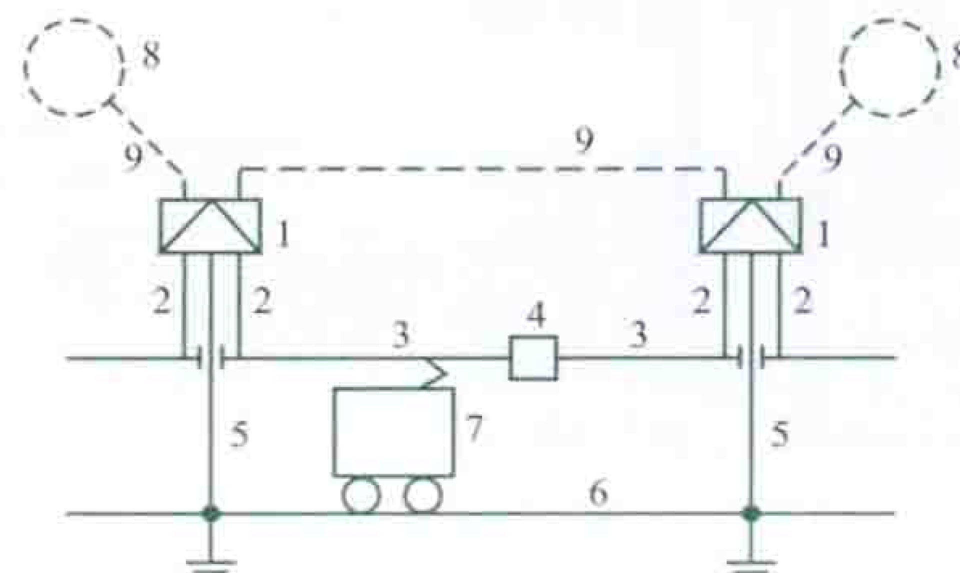


图1 电力牵引供电系统示意图
1—牵引变电所；2—馈电线；3—接触网；4—分区所；5—回流线；6—钢轨；7—电力机车；8—电力系统变电站；9—高压输电线（虚线为外部电源）

牵引变电所 将电力系统高压电变换成适合电力机车使用的电流、电压的设施。根据电流制的不同，牵引变电所可分为直流和交流两大类型。（见电力牵引变电所）

牵引网 电力机车受电和回流网络的总称。其基本组成部分为接触悬挂和回流系统。接触悬挂为电力机车提供滑动接触的受流条件（见电气化铁路接触网），馈电线是连接牵引变电所和接触网或经开闭所连接接触网的线路，而回流系统则为牵引回流提供了回路。由钢轨构成牵引电流返回通路时，轨道回路的构造与闭塞方式（见铁路信号）有关，在半自动闭塞区段，牵引回流在钢轨中的流动不受限制，仅要求对所有轨缝用导线焊接连通。在自动闭塞区段，钢轨中除有牵引电流外，还有信号电流。由于牵引回流要求沿钢轨流回牵引变电所，而信号电流却只允许在闭塞分区内流动，为此，在两相邻闭塞分区设有绝缘轨缝和扼流线圈（见图2）。两个线圈分别设在绝缘轨缝的两侧，两端接钢轨，中性点接吸上线。其特性要求：①保证沿两根轨条流动的工频牵引回流在不同闭塞分区间顺利通过；②阻止闭塞分区内部流动的低频信号电流进入相邻闭塞分区。

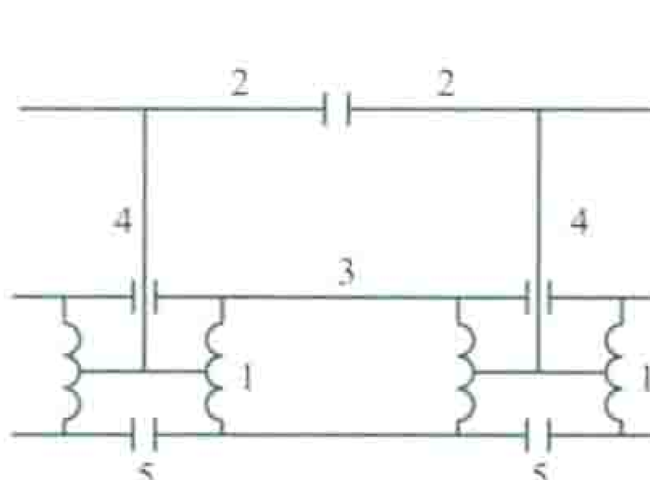


图2 自动闭塞区段绝缘轨缝连接图
1—扼流线圈；2—回流线；3—钢轨；4—吸上线；5—绝缘轨缝

分区所 相邻牵引变电所供电分界处的分段设施。主要设备有断路器、互感器和隔离开关。分区所可根据需要改变接触网（见图3）运行方式，提高供电灵活性和供电质量。（见电力牵引分区所）

开闭所 提高接触网供电灵活性和缩小事故范围的供电分段设施。一般设在：①具有若干个独立车场的车站。此时开闭所由牵引变电所或正线接触网引入1～2回进线，经母线后分成若干回出线，分别送至不同车场，使各车场可分开停电，互不影响。②采用AT供电方式（见电力牵引AT供电方式）的复线区段馈电臂的中部。此时开闭所将一个馈电



图3 电力牵引接触网（严浩 摄）

臂分成上、下行共4个独立部分，每部分可按需要投入或退出运行。

电力牵引调度所 对电气化铁路牵引供电设备实行统一调度、集中监控的场所。

dianli qianyin misan dianliu

电力牵引迷散电流 （leaking current of electric traction） 电力牵引在利用钢轨作为回流导体时，由钢轨通过轨-地间泄漏电阻泄漏到大地的电流。直流牵引时，加到接触网的电压为正极，加到钢轨的电压为负极，导致在机车取流处附近的钢轨电位较地电位高，迷散电流由钢轨流向大地；在变电所附近钢轨电位较地电位低，迷散电流由大地返回钢轨并回归变电所负极。当邻近电气化铁路有地下金属管道或其他地下建筑物金属构件时，迷散电流将在钢轨电位的正极区进入地下金属管道，在变电所附近的钢轨电位负极区由地下金属管道流出，进入钢轨。迷散电流在由钢轨或地下金属管道流出时，将产生电解作用，使阳极金属遭到电蚀。变电所附近地下金属管路在直流牵引迷散电流持续电解作用下，将加速腐蚀。交流牵引时迷散电流对地下金属导体的电解作用较弱，约为直流牵引时的1%，通常可不采取任何防护措施。

为了防止直流电气化铁路对沿线地下各类金属导体的破坏，应该对电气化区段的迷散电流做必要限制。主要措施有：

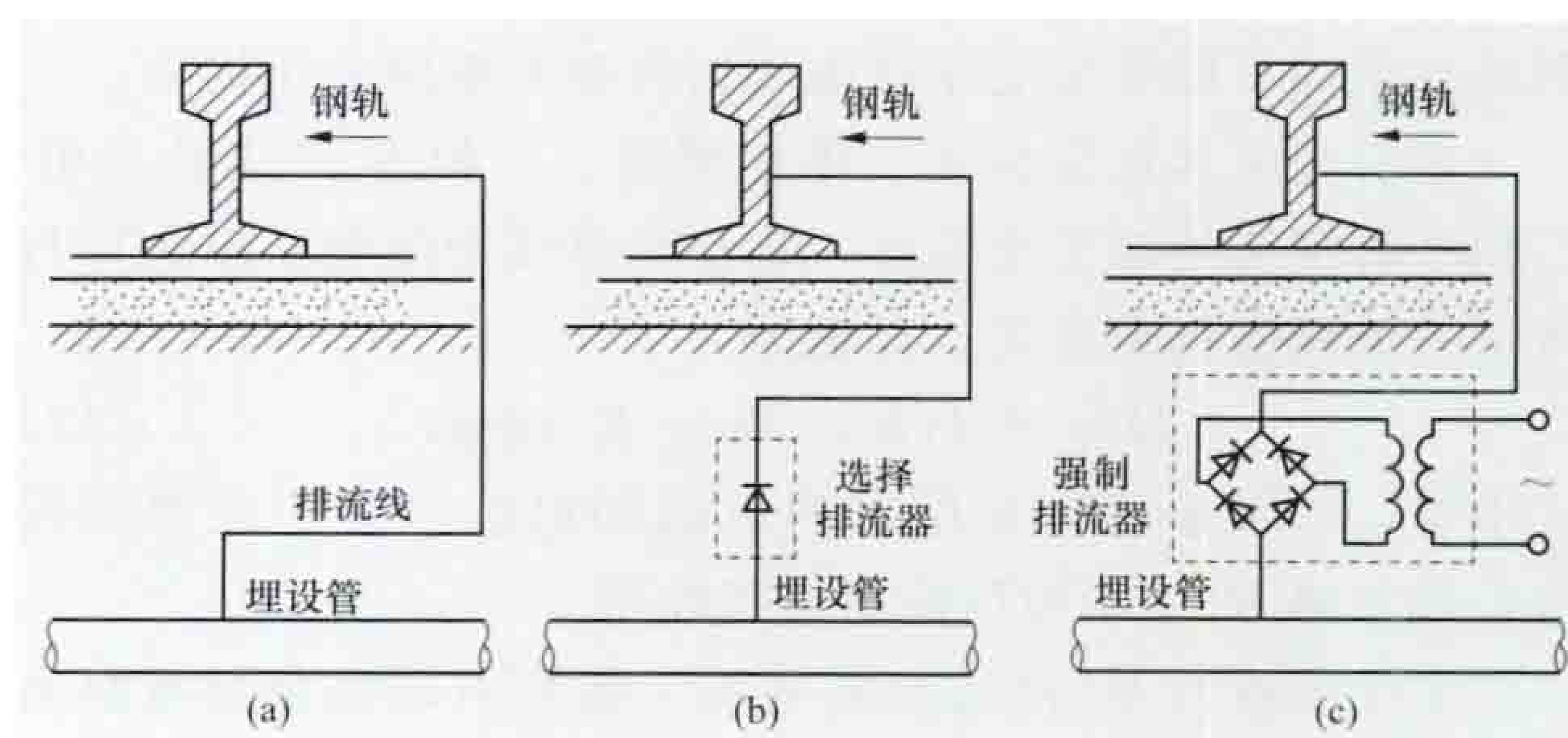
（1）限制钢轨回路的电压降。有些国家的泄漏电流腐蚀防护规程规定：每公里轨道回路的电压降不得超过3V。

（2）限制轨缝连接处的接头电阻，规定每个接头的附加电阻不得超过3m钢轨的电阻。为此，应以截面积不小于$70mm^2$的铜绞线对轨缝实行焊接，而且焊接面积不应小于$250mm^2$。

（3）其他减少泄漏电流的办法有增加轨-地间过渡电阻（采用砾石道碴、保持道床清洁干燥）、减小吸流点间距、将接触网改为负极性等。

（4）对地下金属管线涂防护绝缘层。

（5）采用电气排流措施。图（a）所示为直接排流法。在变电所附近将被保护地下管道与钢轨直接连通，将迷散电流引回钢轨。这种方法接线简单，造价低。但在多个电力牵引变电所并联供电的条件下，可形成某电力牵引变电所附近钢轨电位处于正极性区，使电蚀作用加剧。图（b）所示为可防止逆向排流的选择排流法。图（c）所示为强制排流法，利用桥式整流电路和外加交流电源，令钢轨电位较埋设管电位更低，实现强迫排流。这种方式亦称阴极保护法，其排流效果最好。



电气排流法示意图

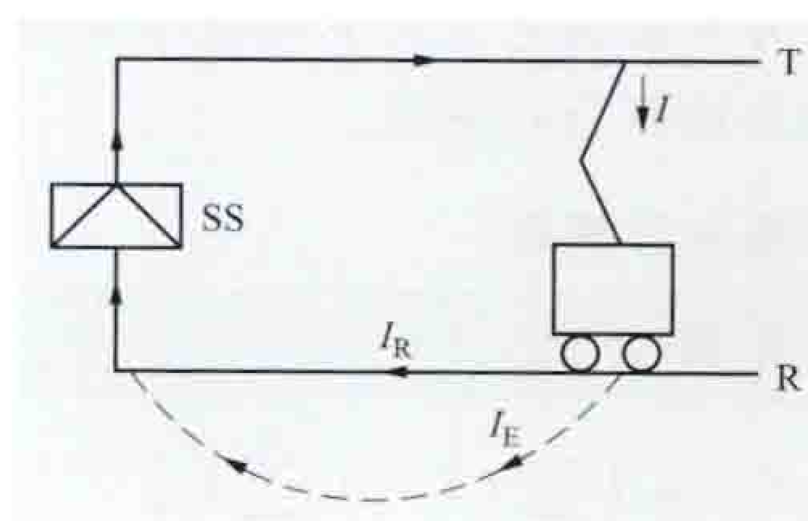
（a）直接排流法；（b）选择排流法；（c）强制排流法

（6）牺牲阳极保护法。以电离倾向更强的金属（镁、铝、锌）作为牺牲阳极，将处于阳极区被保护对象的金属消耗转移到牺牲阳极。

dianli qianyin zhijie gongdian fangshi

电力牵引直接供电方式 （simple feeding system of electric traction） 将牵引变电所输出的电能直接供给电力机车的一种供电方式。它是电力牵引的基本供电方式，可分为一般直接供电方式（T-R方式）和带回流线直接供电方式（T-R-NF方式）。由于直接供电方式具有简单、经济、实用等特点，得到了广泛应用。同时，它对平行接近架空通信线的有害影响也受到普遍重视，有的国家设立专题进行研究。

一般直接供电方式（T-R方式） 利用钢轨及大地作为牵引电流返回通路的供电方式。电力牵引供电系统一般由电力牵引变电所、牵引网等构成。牵引网包括馈电线、接触网、回流系统等。通常，牵引电流由牵引变电所经馈电线、接触网直接送到电力机车，然后经钢轨和大地返回牵引变电所（见图）。一般直接供电方式的主要特点：①利用钢轨、大地回流，牵引网结构简单、造价低、施工及运营管理方便。②地中电流大。在直流电气化铁路上，地中的迷散电流对地下金属构筑物腐蚀严重。在交流电气化铁路上，流经大地的迷散电流虽不会对地下金属构筑物产生严重腐蚀，但却可因接触悬挂和钢轨中牵引电流不平衡而对沿铁路的通信线路产生干扰（见电力牵引迷散电流）。③钢轨对地电位较高，对运营维修人员安全不利。



直接供电方式示意图

SS—牵引变电所；T—接触网；R—钢轨；I—机车电流；I_R—钢轨电流；I_E—地中电流

带回流线直接供电方式（T-R-NF方式） 沿铁路设有回流线的直接供电方式。回流线又叫负馈电线，与钢轨并联，其架设位置应尽量靠近接触网。

带回流线直接供电方式的主要特点：①由于有了回流线，流经大地的一部分电流改从回流线返回牵引变电所。回流线的电流与接触网电流方向相反，两者对通信线路的相对位置接近，对通信的干扰相互抵消，因而部分减轻了对通信线路的干扰。②牵引网阻抗降低，能耗和电压损失减少，改善了供电质量。③钢轨泄漏电流减小，对地电位降低，对安全有利。④增设回流线，造价相应增加。

dianli tuodong

电力拖动 (electric drive) 以电动机作为原动机拖动机械设备运动的一种拖动方式，又名电气传动或电力传动。电力拖动可以实现电能与机械能之间的转换，并能按照生产工艺要求控制电动机输出轴的转矩、角加速度、转速、角位移（对于直线电动机则相应为力、加速度、速度、距离）以及被拖动机械或机械组合的起动、运行、变速、制动等。电力拖动的应用在节约能源、改善劳动和环境条件、提高产品的质量和产量、节约原材料等方面带来了明显效益。电力拖动已广泛应用于工业、农业、商业、军事等行业的加工、运输、设备制造以及改善环境条件等诸多方面。

组成　电力拖动主系统是由电动机、传递机构、工作机械组成的机电系统。如图1所示，电动机的输入端由电源经过功率开关和控制元件供电，其输出端通过传递机构以一定的传递比与工作机械相连接。按电动机供电电流的不同制式，可分为直流电力拖动和交流电力拖动。

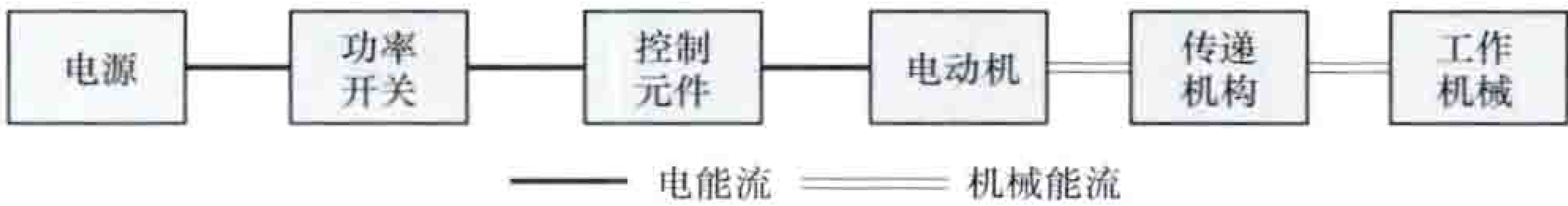


图1　电力拖动主系统组成框图

电力拖动中各个设备和装置的技术特点与典型负载（工作机械）的负载特性，负载的工作制，传动用电动机（直流电动机、感应电动机、同步电动机及一些特殊电动机）的原理和基本特性，电动机的起动、调速和制动方法等有关。

为了使电力拖动按期望的方式运行，应当对电力拖动的运行加以控制、保护和监视，因而应增加控制、保护、测量和监视等分系统，即信息处理分系统。电力拖动主系统和信息处理分系统一起构成完整的电力拖动控制系统。

特点　①运行参数范围广。输出功率为1W～100MW。转速为$1\sim10^5$ r/min。调速精度可达几十万分之一。单台电动机的调速比达万倍以上。输出转矩可大于10^6N·m。②环境适应性强。电力拖动既不使用有危险的燃料，又不排出废气，不污染环境，转矩平稳，振动轻，噪声小，可用于全封闭，强迫通风，沉浸在液体、特种气体之中以及曝露于有易爆或放射性物质的环境之中。③可在瞬间加上全负荷而不必预热，短时过载能力大，可长期安全运行。④控制性能好，能量的转换效率高，易于实现转矩-转速平面的四象限运行。回馈制动时能量可回收（回馈电网）。⑤可方便地构成自动控制系统。⑥大型电力拖动变流装置对其供电网络可能产生不良影响，即引起高次谐波的干扰以及功率因数降低，必要时需相应解决谐波吸收及无功补偿问题。⑦电力拖动设备通常由电网供电，与其他动力比较，优点明显。车、船、飞行器中使用的电力拖动设备，则必须另行解决其电源问题。

发展简史　自从1838年俄国人Б.С.雅科比（Борис Семёнович Якоби，1801—1874）完成可供实用的直流电动机以来，电力拖动技术开始逐步形成。同年，Б.С.雅科比使用化学电池给直流电动机供电，用以驱动小船的推进器。1866年德国人E.W.西门子（E.W.Siemens，1816—1892）制造出世界第一台发电机，4个月共载送乘客9万人次。1882年西门子公司将直流串励电动机正式用于电力机车。1883年两相交流电动机原型问世。1889年M.O.多利沃-多布罗沃利斯基（Михаид Осипович Додиво-Доброводьский，1861—1918）发明三相笼型感应电动机。早期的电力拖动系统（见图2）只是利用电器简单控制电动机的起动、制动、正反转和分级调速。1891年诞生了电动发电机组——华德利翁（Ward-Leonard）直流调速系统。1894年德国AEG公司为矿井卷扬机提供了功率为100kW的电动发电机组电力拖动装置。19世纪末到20世纪50年代，电动发电机组直流调速逐步得到发展并推广应用，成为当时性能最优越、应用最广泛的电力拖动系统。其后，还出现了电机扩大机、磁放大器等调速装置。电动发电机组调速装置设备多、体积大、成本高，从20世纪初期即开始尝试采用水银整流器、闸流管等静止变流装置取代旋转的发电机，但性能、可靠性都难以达到电动发电机组电力拖动装置的水平，应用有限。1957年，大功率可控电力电子器件晶闸管问世，由它组成的静止变流装置无论运行性能还是可靠性都有了显著的提升。20世纪70年代以来，电力电子技术突飞猛进，电力双极型晶体管（BJT）、门极可关断晶闸管（GTO）、功率场效应管（power MOSFET）和绝缘门极晶体管（IGBT）等全控型电力电子器件相继发明，由这些器件组成的静止变流装置迅速得到推广应用，已完全取代电动发电机组、电机扩大机、磁放大器等调速装置，成为电力拖动的主流。21世纪以来，以碳化硅器件为代表的高耐压、高开关频率新型电力电子器件也开始在电力拖动中得到应用。

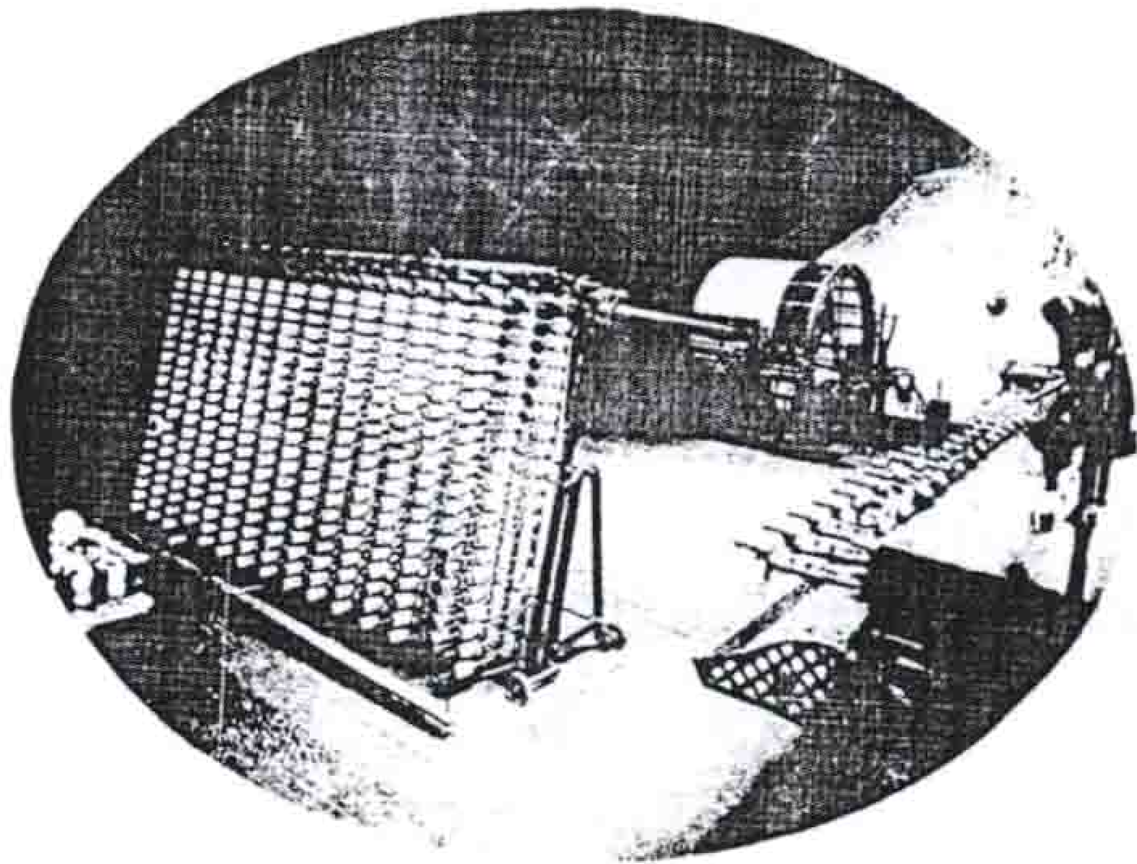


图2　1930年浙江吴兴丝绸业利用电力拖动的纹经机

与交流电动机相比，带机械换向器和电刷的直流电动机可靠性低，功率容量与转速积有限，但基于直流电动机的直流传动系统在20世纪80年代之前一个较长的时期内，由于起动性能、调速性能和转矩控制性能方面的优势，在调速要求较高的应用领域里一直占据主导地位。随着全控型电力电子器件的发展，简单可靠的变频技术逐渐成为可能，20世纪70年代提出的基于交流电动机动态模型的矢量控制策略和直接转矩控制策略则为交流电动机的高性能控制奠定了理论基础。经过发展，包括各种特种电动机在内的交流电力拖

动系统已全面超越直流电力拖动系统，成为电力拖动的主流和发展方向。

电力拖动控制系统的发展则与新型电气元器件及微电子器件的开发与推广应用紧密相关。20 世纪 30 年代以前，使用继电器-接触器控制。40～60 年代，电子管控制装置和半导体控制装置相继投入应用。80 年代以来，集成电路、大规模集成电路、微机控制在电力拖动中逐渐得到推广应用。2000 年以后，各种专用的高性能的处理芯片，如数字信号处理器（DSP）、现场可编程门阵列（FPGA）等进一步提升了对电力拖动的控制能力，促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化。数字化技术使得复杂的控制算法，如自适应控制、人工智能等算法得以实时完成，简化了硬件，降低了成本，提高了系统的可靠性、性能和智能化程度，使电力拖动系统的操作和维护更加方便。

发展趋势　①对电力拖动系统性能要求越来越高，高性能电力拖动的比重将增加。从节能、提高生产质量、自动化水平等需要出发，将使许多传统采取恒速传动的场合改用调速传动，传统采用一般调速的场合改用高性能伺服传动。②非线性解耦控制、自适应控制、模糊控制、人工神经网络控制等新的控制策略将不断应用，推动交流电力拖动控制技术的进一步发展。③电动机调速系统进一步向大功率、超微型、高性能方向拓展。④变流装置进一步向高效率、高频率、大功率方向拓展。⑤越来越多地应用于车辆、机车、舰船推进等，在净化环境方面发挥重要作用，将促使相关技术（化学、物理电池等）发展进步。⑥将带有信息处理和控制功能的电力拖动系统附加或融合在机械装置中，形成机电一体化的电力电子电动机。

dianli tuodong dianxing fuzai texing

电力拖动典型负载特性 (typical load characteristic of electric drive)

电力拖动负载转矩 T_L 随转速 n 的变化而变化的曲线，又称负载转矩特性。为生产机械选配电力拖动系统时，必须考虑到将要建立的新系统在运动过程中能否稳定，及所选系统的输出特性既要符合工艺要求，又要经济合理。为做出这些判断，除了要掌握电动机的机械特性外，还要知道被拖动机械的负载转矩随转速而变化的特性。典型的负载特性有恒转矩负载特性、恒功率负载特性、风机和泵类负载特性 3 种。实际生产机械负载转矩特性也可能是以上三种典型特性的综合。

恒转矩负载特性　负载转矩不随转速变化，且保持恒定或大致恒定的负载特性。恒转矩负载特性又可分为反抗性恒转矩负载特性和位势性恒转矩负载特性两种。

图 1　反抗性恒转矩负载特性

（1）反抗性恒转矩负载特性。恒值负载转矩总是与运动方向相反的负载特性，见图 1，如机床的平移刀架、造纸机等的负载特性。有的电力拖动被拖对象的反抗性负载转矩是转角的周期性函数。活塞式压缩机即属此种类型，其转矩可按平均转矩考虑。

（2）位势性恒转矩负载特性。恒值负载转矩具有固定的方向，不随转速方向改变而改变的负载特性，见图 2，如起重机、电梯等的克服重力做功型负载。

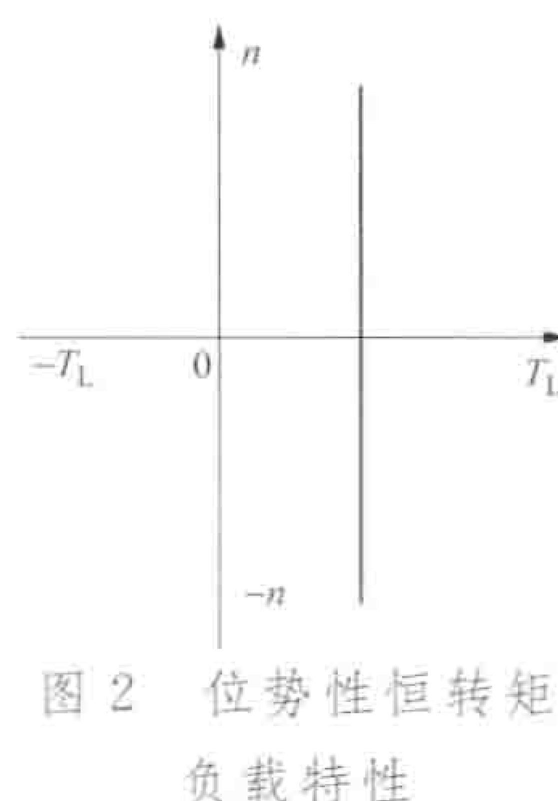


图 2　位势性恒转矩负载特性

恒功率负载特性　在调速时电动机的输出功率保持恒定或大致恒定的负载特性，T_L 与 n 的关系是双曲线，见图 3。如要求恒张力收卷的卷取机，设上道工序加工出来的带材的移动速度 v 为恒定值，忽略卷筒的机械阻力，则仅需保持卷取电动机的输出功率不变，即可在稳定的收卷过程中（包括卷径由小变大的过程）保持带材的张力 F 不变。卷取电动机的输出功率 $P=Fv=kT_Ln$，其中 k 为常数。在 F、v 都为恒值情况下，控制卷取电动机在不同转速下的输出功率不变，卷取机就成为恒功率特性的负载，见图 4。

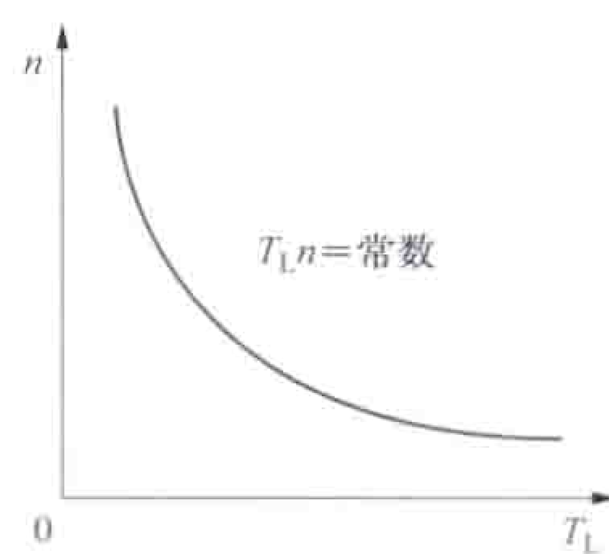


图 3　恒功率负载特性

风机和泵类负载特性　风机和泵类负载转矩与转速 n 的二次方成正比，$T_L=kn^2$，因此其负载特性是一条抛物线，见图 5。具有风机和泵类负载特性的机械设备有风扇、油泵、水泵等。

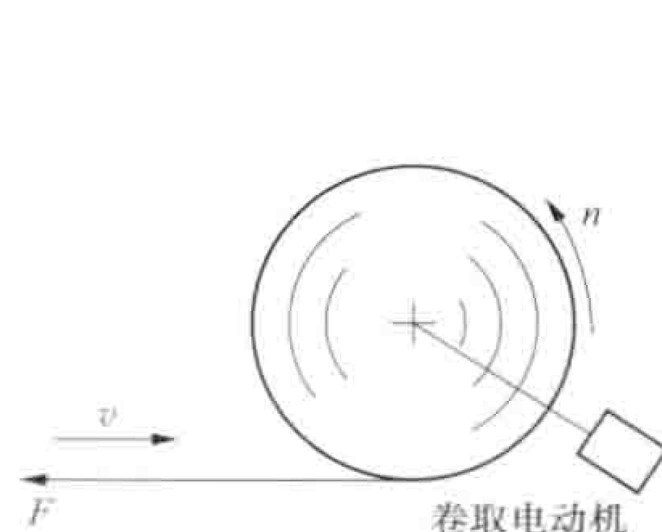


图 4　卷取机示意图

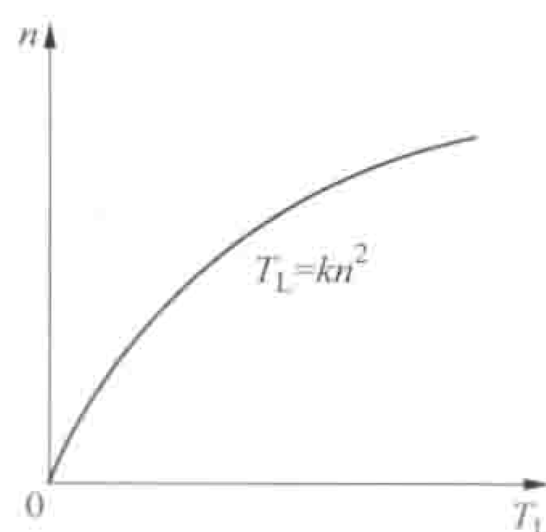


图 5　风机和泵类负载特性

dianli tuodong fuzai gongzuozhi

电力拖动负载工作制 (load duty of electric drive)

电力拖动控制的对象（在工业生产中通常为生产机械）所承受的一系列工作状况。它包括起动、制动、空载、停机等不同负载状态持续时间和先后次序。电力拖动应与其控制对象所需要的工作制相适应。为此，就需要对各类生产机械的工作制状况进行分析、归纳。电力拖动负载工作制可分为连续工作制、短时工作制、断续周期工作制 3 类。

连续工作制　生产机械长期恒速（或变化不大）运行。根据负载施加方式不同，又可分为连续工作制平稳负载、连续工作制波动或重复短时负载、连续工作制短时负载 3 种。

连续工作制平稳负载指负载转矩长期不变或变化不大，如风机、循环水泵等。它们对电力拖动系统的要求是有足够的功率和起动转矩。

连续工作制波动或重复短时负载指长期施加负载，但存在大小波动或周期性重复施加的情况，如某些恒速轧钢机。它们对电力拖动系统的要求是有足够的功率、起动转矩和过载转矩。

连续工作制短时负载指施加负载时间很短，施加负载时间占全部工作时间的比例很小。这类机械通常有较大转动惯

量，施加负载时，速度略降低，释放出动能做功，电动机功率可适当减小。它们对电力拖动系统的要求是有足够的起动转矩和过载转矩。

短时工作制 生产机械经较长时间（电动机冷却到与冷却介质温度之差在 2K 之内）间隔起动、停止或加减速一次，完成一个工作循环，如起停式剪切机械。要求电力拖动系统提供足够的起动转矩及过载转矩，发热校验通常均能通过。它们对起动、制动、加速和减速时间、行程有要求，因此需有足够的加减速动态转矩。

断续周期工作制 生产机械周期性的起动、停止或加速、减速的时间间隔较短，如可逆轧机、矿井提升机械等。它们除了要求有足够的起动、制动转矩，以满足机械对加速和减速时间、行程的要求和过载能力外，还应进行发热校验，更要考虑加速、减速电流所增加的损耗。

dianli tuodong kongzhi shebei

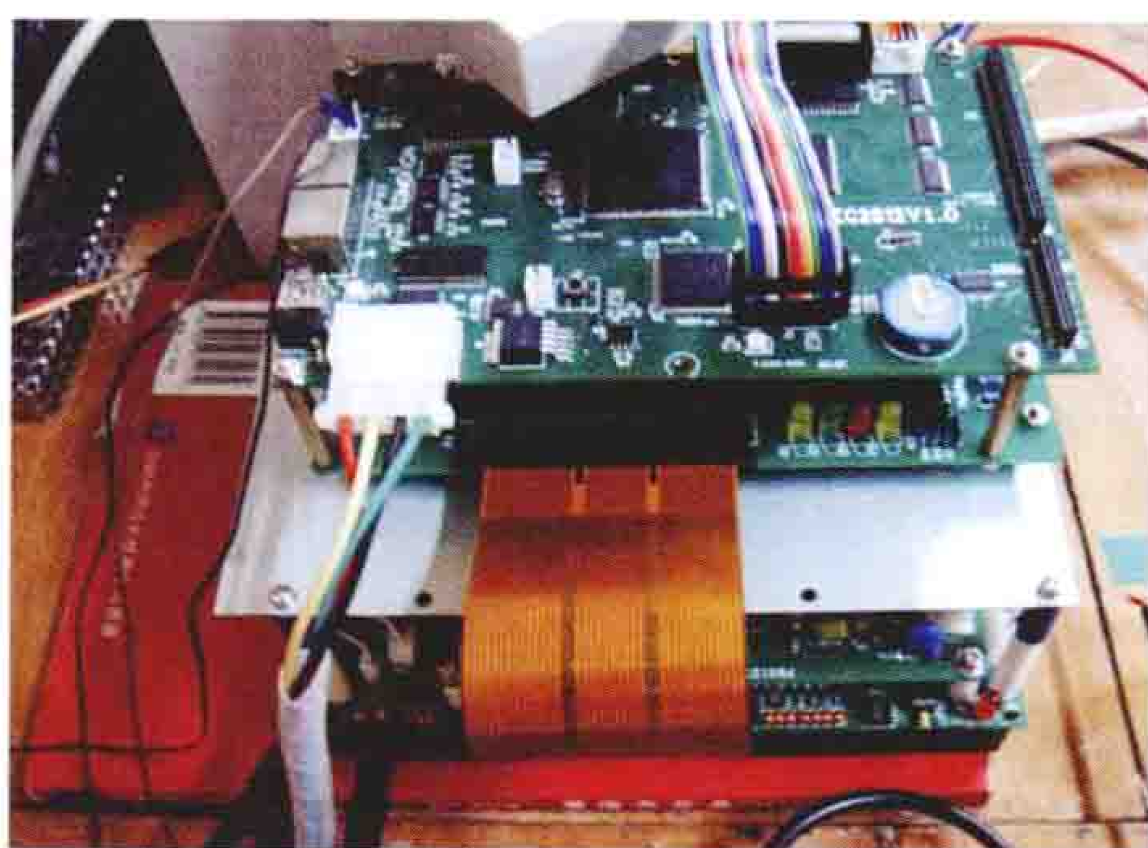
电力拖动控制设备 (electric driving control gear)

控制用电设备的开关电器与控制、测量、保护和调节、功率变换等装置的组合及上述电器和装置的互相连接部分、辅件、外壳和支持件组成的成套设备。电力拖动控制设备主要包括低压电器电控设备、装有电力电子器件的电控设备、自动化电控设备。

低压电器电控设备 以电动机为主要控制对象，以开关电器为主组成的控制、测量、保护和调节装置。如起动笼型感应电动机用的星-三角起动器、起动绕线转子感应电动机用的频敏起动器等。（见起动器）

装有电力电子器件的电控设备 以电动机为主要控制对象，以电力作为能源，使用电力电子器件，按照规定的指令控制电动机拖动工作机械完成起动、制动、运转方向、工作转速及工作程序等功能的控制设备。如晶闸管（thyristor）相位控制的龙门刨床电气控制设备、电力双极型晶体管（BJT）作功率器件的水泵电气调速设备等。

自动化电控设备 使用可编程序控制器、微型计算机、屏幕显示装置及有一定智能的检测、保护装置实现故障自诊断及以某种最优化为目标的控制、调节、保护等功能的电控设备。如带有故障自诊断功能的全数字调速装置、群控电梯自动调度及故障自诊断装置等。图示为数字化交流电机控制系统。



数字化交流电机控制系统

dianli tuodong kongzhi xitong

电力拖动控制系统 (electric drive control system)

实现电力拖动并保证电力拖动按期望的方式运行所加的控制电路等构成的整体。电力拖动是以电动机作为原动机拖动生产机械运动的一种拖动方式。随着生产过程向自动化、连续化发展，生产机械常常需要依靠电力拖动来完成各种复杂的运动，使生产机械能够按要求加速、减速、制动、反转，使被控制量保持恒定或按一定的规律变化等。这些要求通常由一套完善的控制、保护和监视电路来实现。

系统构成 电力拖动控制系统的基本构成如图 1 所示。全系统包含有两个分系统：一个是能量分系统，为传动系统的功率部分，又称主系统；另一个是信息处理分系统，实现控制、保护和监视的功能，又称控制、保护及监测系统。信息处理分系统输出的控制量，传送到能量分系统中某些部件（如功率开关、控制环节和开关驱动电路等），对工作机械产生影响。控制量和显示量均是由给定量和反馈量经过信息处理分系统按一定规则作用而形成的量。各个分系统还存在内部扰动量，它们将产生不利的影响，包括系统元件之间的寄生耦合，系统元件的磨损、腐蚀及疲劳效应等。全系统有给定量和扰动量两种输入量。给定量所载有的指令信息是由操作人员手动给出的，或者是由上一级自动化功能装置发出的；扰动量是以独立变量形式作用在传动系统上的，并且对系统的功能和特性常产生不利的影响。系统的输出包括与功能有关的输出量以及有害量。输出量是受控制作用影响的变量，即被控量，如机械部件的行程、角度、速度和加速度。有害量包括机械振动、杂音、噪声、能量损耗及其引起的发热现象、电磁场辐射及其干扰、开关过程中由变流装置控制环节引起的对电网不利的反作用等。显示器向操作人员提供传动系统及其元件运行状态和运行能力的显示，如显示电动机电压、电流、转速及其他被监视的量。

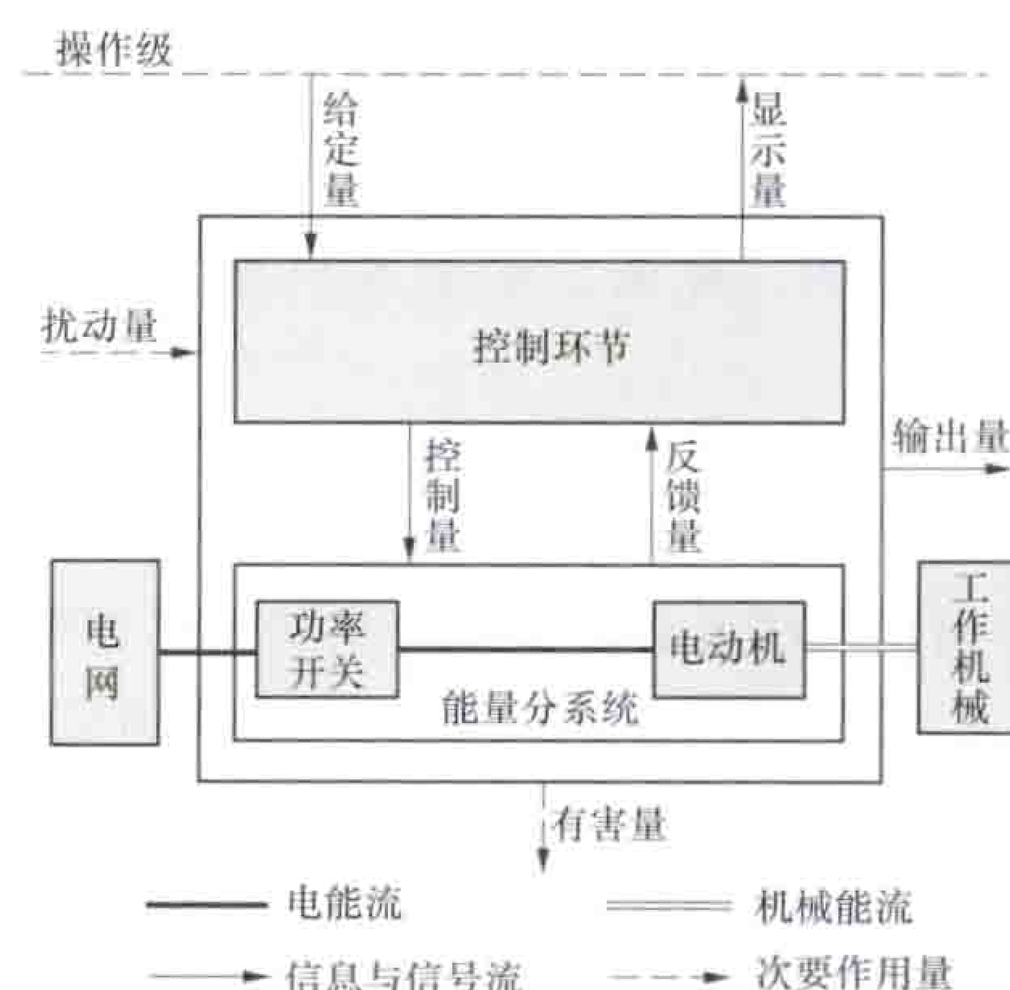


图 1 电力拖动控制系统的基本结构

分类 电力拖动控制系统按被控量的特征或被控量与给定量之间的关系可以分为转速控制、转矩控制、张力控制、位置控制、伺服系统、交流电轴等。根据给定量的不同变化规律，可以分为定值（恒值）系统、随动系统、程序系统。

转速控制 对电动机进行加速、减速、起动、制动、正转和反转的控制。转速控制是生产机械对电力拖动控制系统最普遍的要求。

转矩控制 对电动机输出电磁转矩的大小和方向的控制。这是生产机械对电力拖动控制系统的最基本要求。转矩控制是实现转速控制和位置控制等的基本组成部分。

张力控制 对在两个加工设备之间做连续运动或静止的被加工材料所受的张力（拉力）进行的控制。在各种连续生产线上，各种带材、线材、型材及其再制品，在轧制、拉拔、压花、涂层、印染、清洗及卷绕等工序中常需要进行张力控制。张力控制可以是恒张力控制，也可以是变张力控制。

位置控制　对被驱动物体的空间位置进行的控制。空间位置可以是一维、二维或三维空间的位置。位置控制应用非常广泛，各种机械加工设备、许多工业装置都需要进行位置控制。

伺服系统　使输出变量精确地跟随或复现某个过程的电力拖动控制系统。在很多情况下，伺服系统是指被控制量（系统的输出量）为机械位移或位移速度、加速度的反馈控制系统。其作用是使输出的机械位移（或转角）准确地跟踪输入的位移（或转角）。如船舶的舵机装置、坐标镗床、冲床、铣床、车床等机械加工设备等都要用到伺服系统。

交流电轴　利用绕线转子感应电动机实现两点以上传动点的同步运转的系统。交流电轴用于龙门吊，船闸闸门、水库闸门开闭装置，大型金属切削机床等生产机械。

定值（恒值）系统　系统的给定量为常值。定值（恒值）系统的基本任务是保证在任何扰动作用下，使输出保持恒定的期望的数值。如在运行过程中保持电动机的转速或由转速决定的某一工艺参数（如机床车速、张力、线速度等）为期望的数值。定值（恒值）系统最常见的是稳速系统。工艺过程其他参数的定值（恒值）系统与稳速系统的结构和作用原理是有区别的，将它们归并为同一类，只是为分别研究提供一个基础。

随动系统　系统的给定量是预先不知道的时间函数。随动系统的基本任务是保证在任何扰动作用下，使输出量复现可能按任意规律变化的输入（给定）量。如高炮自动控制系统，其输入量是敌机的高低、方位、距离等未知变量，输出量（炮管运动）必须跟踪输入量（敌机目标）。随动系统又称跟随系统（或跟踪系统），有位置跟随、速度跟随和加速度跟随。随动系统在军事、航空和航天以及一般工业中得到了广泛应用。

程序系统　系统的给定量随时间有一定的变化规律，并由程序给出。程序系统的基本任务是使输出按给定的程序变化。数字程序控制系统应用最为普遍。在仿型金属切削机床上，是以产品工件模型的形式给出程序的，用以实现切削刀具在产品工件上重复模型形状的运动。

技术要求　为了满足不同负载的需求，现代电力拖动控制系统需要完成各种形式不同的运动。实现这些不同运动的技术要求主要有：①自动地控制起动、制动和反转，以及维持速度、转矩和功率在一定的水平上，并具有足够的准确度和快速性；②准确地复现由人工或指令装置给出的指令信息，以满足生产过程、科学试验以及日用电器的技术要求；③为确保操作人员及技术设备的安全和防止不允许的运行状态，系统应能自动保护与闭锁；④为进行观察、报警、抑制干扰、产生调节指令以及记录、储存或者在指令装置上进行信息传递等，应设有测量及监控装置；⑤提高系统的效率，降低装置成本，减少能量消耗，减少系统对周围或电网中其他系统和设备的影响。

方案选择　在明确了某电力拖动控制系统的具体任务和技术要求之后，其方案选择是极其重要的，包括功率回路、控制回路及保护和监视回路的方案选择。功率回路为能量分系统，控制回路、保护和监视回路组成信息处理分系统。

功率回路方案　电力拖动控制系统设计的任务是使电动机的运动转变为所需要的旋转或直线运动。这种转变是在能量分系统内实现的，这部分通常称为功率回路。减速器可以使电动机的运动与所使用场合的运动相匹配，从而可以应用标准的电动机。为了能节约减速器费用、减小装置体积和机械传递损耗，并且使系统有良好的动态性能，应尽可能地简单、集中，无减速器或少减速器传动。采用无减速器传动可以突破有减速器传动的功率限制和转速限制，但是需要使用特种电动机。表1列出了几种可能的选择方案。电动机类型的选择，即选用直流传动还是交流传动，取决于系统性能的要求和周围的条件。（见直流电动机调速、交流电动机调速）

表1　功率回路方案选择

运动类型	旋转运动			直线运动	
所要完成的任务	在负载（转矩）$T_L=f(\omega, t)$时控制转速$\omega=f(t)$			在负载力$F_L=f(v, t)$时控制速度$v=f(t)$	
应遵守的补充条件	运动过程没有限制			运动过程有一定的限制	
可能方案	用旋转电动机实现		利用轮盘、齿轮或丝杠将直线运动变换为旋转运动，或把旋转运动变换为直线运动	用直线电动机实现	
	无减速器旋转传动装置	利用减速器使电动机的运动与工作机械的运动相配合		利用连杆机构使电动机的直线运动与工作机械相配合	无减速器直线传动装置
应用实例	初轧机、管磨机传动装置	压缩机、车床和铣床的主轴传动装置	导轨传动装置、进给传动装置、伺服传动装置、起重机	包装机	运输底板传动装置、开门传动装置

控制回路方案　控制回路是信息处理分系统的主要部分，需根据系统要求确定控制回路的信号类别和结构。

首先应选定信号的类别，表2对可能采用的几种信号进行了比较。除了采用典型的两状态信号、幅值模拟式信号和其他数字式信号外，还有的采用频率模拟式信号和相位模拟式信号。后两种信号种类兼有模拟式信号和数字式信号的优点。模拟式信号的优点是，只要采用简单的外部接有电路元件的放大器，就可以实现调节回路的动态校正。采用数字式信号时，则需要一定的计数和运算电路才能解决。从经济上看，采用两状态信号要比采用模拟式信号好，采用模拟式信号要比其他数字式信号好。从精度和分辨率来看，数字式信号要比模拟式信号好。决定用哪种信号时，也需要考虑到制造、试验等问题。

表 2　电力拖动控制系统中的信号

名称		信号波形	典型的输入装置和测量装置	其他选择准则
模拟式信号（信号参数可以在一定的范围内任意取值）	1. 幅值模拟式信号		电位器，测速发电机，直流变换器，电位隔离装置	装置成本极低，对扰动很敏感，实际上不能存储信号
	2. 频率模拟式信号	$f=\frac{1}{T}$	频率发生器，增量式速度发送器测量装置	可以有高的精度，对扰动相当敏感，信号容易变换为本表中 6 或 7 的形式
	3. 相位模拟式信号		旋转变压器，自整角机，感应同步器	可以有高的精度，装置成本很低，对扰动敏感信号容易变换为本表中 6 或 7 的形式
	4. 脉冲宽度调制信号		极限值发送器	装置成本低，可实现快速调节
数字式信号（信号参数可以在有限的数字范围内取值）	5. 两状态信号		开关，继电器，极限值发送器	装置成本很低
	6. 多点式信号 I 为每节拍间隔 T 内的脉冲数		频率发生器，与节拍发送器连接的增量式速度发送器	信号可以存储和准确地复现，可以有高精度和高分辨率，信号容易变换为本表中 7 或 8 的形式
	7. 串行数字信号信息参数 I_1，I_2，…，I_n（$n>1$）		穿孔带阅读器，编码输入装置，行程和角度编码测量装置	信号可以存储和准确地复现，可以有高精度和高分辨率，可以在计算机中进行信号处理
	8. 并行数字信号信息参数 I_1，I_2，…，I_n（$n>1$）	$I_1=1$，$I_2=0$，$I_3=1$，$I_4=1$	穿孔带阅读器，编码输入装置，行程和角度编码测量装置	信号可以存储和准确地复现，可以有高精度和高分辨率，可以在计算机中进行信号处理

注：I 为输入的信号值，可为幅值或脉冲数。

控制回路主要有开环调节和闭环调节两种基本调节系统。①开环调节系统。没有反馈量的调节系统。因而在某种扰动作用下使输出变量偏离给定值时，系统给定量（输入端的控制信号）仍保持不变。开环调节系统常用于精度要求不高的控制系统中。如图 2（a）所示，当电网电压的变化、负载转矩的变化等扰动作用于控制对象（如变流器、电动机和生产机械）时，会导致输出量偏离给定值。②闭环调节系统。带有反馈量的调节系统。当输出变量的实际值偏离给定值时，通过从系统的输出端引出被控量的反馈量到输入端，与给定值相比较，将两者比较后的偏差作为控制信号，使作用到能量分系统的控制量发生变化，输出量自动地回复到给定值所确定的数值。闭环调节既可以提高调节精度，也可以改善系统的动态品质。如果以最大的允许加速度、减速度使电动机起动、制动或正转、反转，输出量能无时延地跟随输入量而变化，使系统稳定工作。图 2（b）和图 2（c）所示为单闭环调节系统。如果所完成的任务只是监视极限值或只是控制一个量（如转速或电流），则可采用单闭环调节系统。监视极限值的系统，可以按照测量极限值的原理构成具有两状态环节的两状态单闭环调节系统，如图 2（b）所示。一般电力拖动控制系统的应用中，往往需要调节好几个量（如转速和电流），由两个或多个闭环调节回路来共同控制一个调节对象，可以采用并联调节系统或串联调节系统，如图 2（d）和图 2（e）所示，即多闭环调节系统。并联调节时，由一个转换电路决定让哪个闭环起作用。这个工作回路可以是具有最大调节偏差的调节回路。采用模拟式调节时，转换电路用电阻-二极管网络；采用数字式调节时，用数字程序实现闭环调节。串联调节系统的特点是内环的输入量由外环供给，因此，所有的调节回路都始终工作。内环的调节作用是使外环的调节任务更为简单化。

保护和监视回路方案　在分析电力拖动控制系统与电网、操作台等的连接，作用于电力拖动控制系统上的外部扰动量和可能的内部扰动量等问题基础上，制订出保护和监视

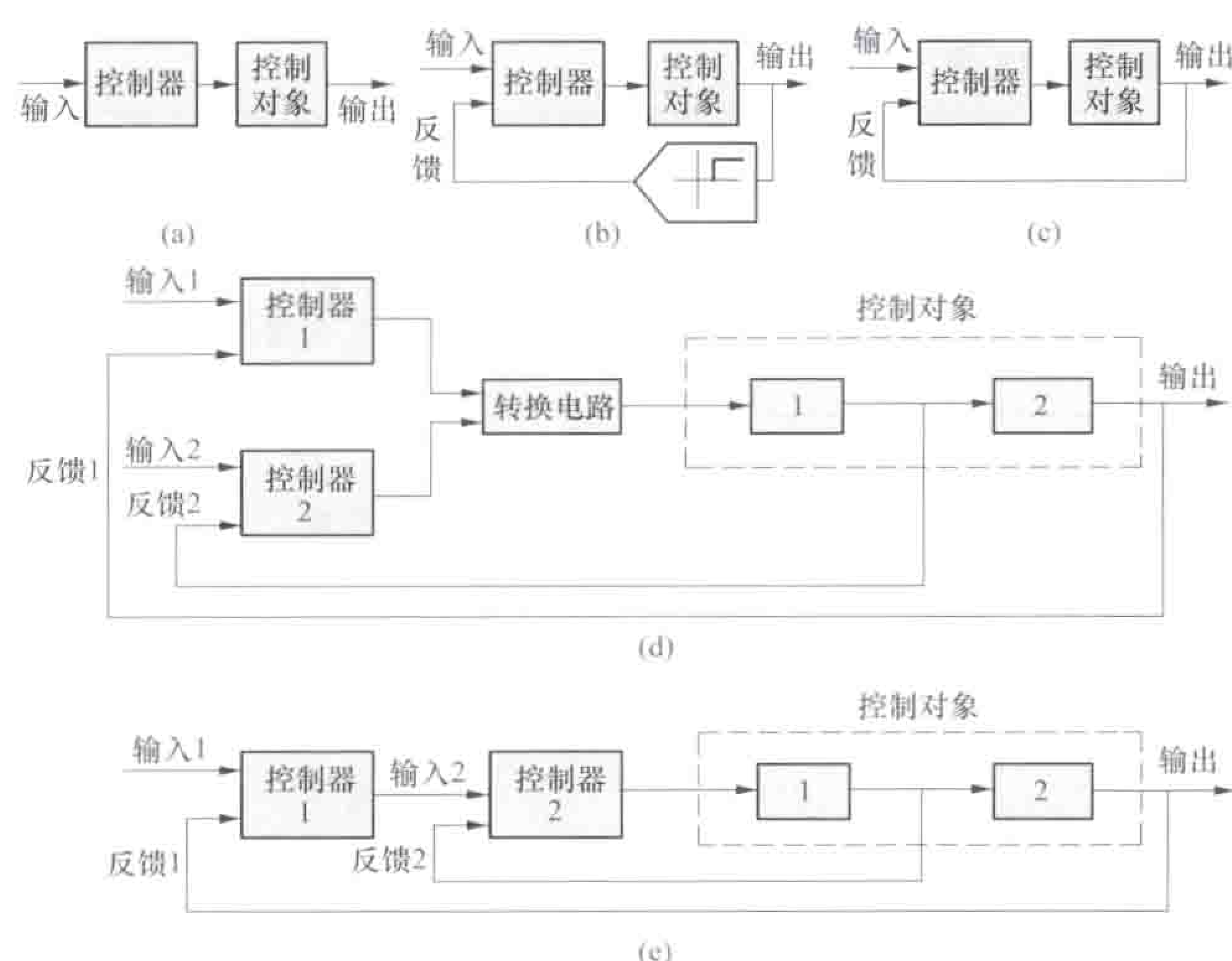


图 2 电力拖动控制回路调节系统框图

(a) 开环调节系统；(b) 两状态单闭环调节系统；(c) 模拟式单闭环调节系统；(d) 多闭环并联调节系统；(e) 多闭环串联调节系统

回路的方案。保护和监视回路主要包括：对功率回路的组件所采取的保护措施，对信息处理装置所采取的保护措施，对电力拖动控制系统运行状态和运行能力的检测和监视等。图3所示为整流装置的保护、监视方案示意图。

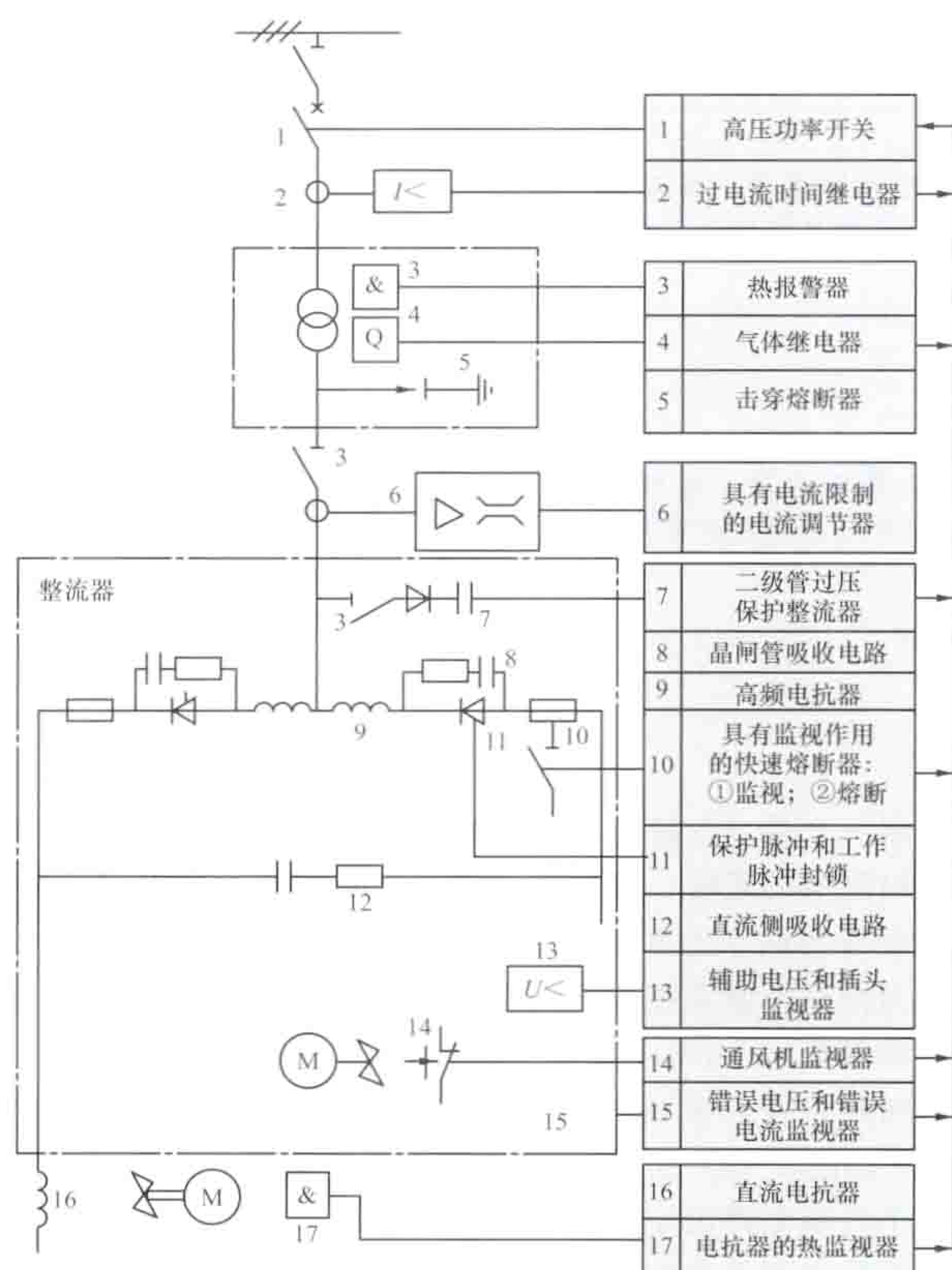


图 3 整流装置的保护、监视方案示意图

(1) 功率回路的保护。电动机的保护应根据所选用的电动机类型、容量及所带生产机械类型、重要性等因素，按电工设备的有关标准，确定相应的保护，一般装设有过电流、过电压、低电压、过负荷等保护。(见直流电动机保护、交流电动机保护)

由于电力拖动控制系统采用的电力电子装置愈来愈多，功率回路的保护还应包括对电力电子装置的保护。电力电子装置受所用器件性能的影响，承受过电压、过电流的能力比较差，通常电动机、变压器可在几倍的额定电流下工作几秒钟或几分钟，而电力电子器件只要0.1s甚至更短时间就已损坏。为了提高电力电子装置的可靠性，除合理选择电力电子器件的电流、电压和功率容量外，还应采取过电流保护和过电压保护。电子装置过电流保护主要有快速熔断器、交流断路器、快速直流开关、快速短路器、电子电路检测和保护5种。电力电子装置一般同时采用几种过电流保护措施。电力电子装置的过电压保护常用的有阻容吸收电路、非线性电阻器件、电子电路检测和保护3种。集成化的电力电子模块一般都有自带的保护功能。

(2) 信息处理装置的保护。主要包括电控设备的自诊断系统和电控设备对外界磁场和电场耦合扰动的抑制措施。

(3) 系统的检测和监视。对电力拖动控制系统的正常运行和非正常运行及故障的监视，以及对故障所采取的保护，都需要对系统中重要的电量和非电量加以检测。电量包括电压、电流等；非电量包括转速、角度、位移或张力等。如检测系统应用微处理器和微型计算机，能实现多点采样，并且具有对数据进行运算、分析、判断的能力，可大大增强检测系统的功能。监视系统包括正常运行、非正常运行和故障的显示。

发展简史及趋势 电力拖动控制系统的发展与控制器件的发展密切相关。20世纪二三十年代以前应用的是继电器-接触器控制；继而出现了交磁放大机控制、水银整流器控制、磁放大器控制；50年代后期晶闸管问世；60年代后期基本上解决了交流调速传动在工业中应用的关键技术问题。体积小、响应快的器件的发展，宽调速、高起动转矩等新型电机的问世，数字控制、计算机控制等新技术的应用，使电力拖动控制系统得到了迅速发展。电力拖动控制系统的调速精度、调速范围都大大提高。随着电力电子技术和控制理论的飞跃发展，电力拖动控制技术已成为电力电子元件与自动控制技术和计算机技术相结合的新领域，电力拖动控制系统实质上已变为电力拖动自动控制系统，并且已由过去的实现单机自动化和进行单参量控制，过渡到实现多机或多变量控制。电力拖动控制系统的技术包括许多不同的领域、学科，例如电机、功率半导体器件、变流器电路、控制理论、信息处理及微电子学等。这些领域和技术的发展直接推动着电力拖动控制系统的发展，使其朝着智能化、耐用化的方向迈进。

感应电动机已经成为主要驱动电动机。随着永磁材料成本的降低和功率密度的提高，采用永磁同步电动机和无刷直流电动机的电力拖动控制系统已得到广泛应用，开关磁阻电动机也因为其高可靠性逐步得到应用。同时新一代智能化机电一体化的电动机也开始出现。

功率半导体器件正向着模块化、快速化、光控化、高压大电流化、自关断化、高可靠性化方向发展。

随着功率集成电路(PIC)技术的发展，功率电路、信号电子装置、传感器可以结合在一起，从而减小了装置的体积。脉宽调制(PWM)技术在变流器和逆变器中用来改进性能，用微处理器来获得PWM模式，可以使逆变器开关损

耗及机械谐波损耗最小。

传统的线性调节器，如 PI（比例积分）、PID（比例积分微分）调节器，对装置的参数变化和负载扰动很敏感，已不能再满足高性能传动应用的严格要求。20 世纪 90 年代以来，采用微控制器进行高速信号处理促进了现代控制技术在传动系统中的应用。自适应控制技术已应用于电力拖动中，调谐控制器参数能适应设备参数的变化以保证理想的闭环性能。模型参考自适应控制可强迫输出响应跟踪参考模型的响应（具有固定设备参数的理想化模型），而不考虑设备参数变化，调整控制器参数以给出理想的闭环性能。采用滑模控制（SLMC）的变结构控制，可以提供参数不敏感特性及规定的动态误差，并且执行起来较简单。除此之外，微分几何理论的非线性解耦控制技术、非线性观测技术、专家系统、人工神经网络等新技术都得到广泛的应用，以实现高性能、高精度的电力拖动控制系统。

微处理器、微控制器和微型计算机使先进且复杂的控制技术得以实现。数字信号处理器朝着高速、高功能化的方向发展，专用于电力拖动控制系统的数字信号处理器已经得到了广泛应用。

dianli yingxiao

电力营销 （electricity marketing） 以满足人们的电力消费需求为目的的基本活动。电力营销将电能产品作为生产要素和生活必需品通过客户服务行为提供给全社会，具有很强的政策性、社会性和服务性。在整个电力营销过程中，供电企业必须贯彻执行国家有关能源政策，正确实施国家关于电力供应与使用政策和一系列合理用电措施，对不断变化的电力需求进行有目标的引导、调整和服务；同时，还要向电力消费者提供安全用电知识和技术、优化合理用电方式及降低电费的知识和技能、供用电法律知识，解决电能生产与消费之间存在的各类矛盾，提供客户服务、信息服务及社会服务等。

沿革 中国与世界上多数国家一样，电力营销都经历了以加强经济手段、改善服务质量来激励电力客户优化用电方式，降低电力企业发供电成本，降低销售电价，扩大销售市场，实施需求侧管理，提升客户服务水平等过程。在中华人民共和国成立初期，采用多数国家使用的两部制电价、功率因数调整电费等手段，激励电力消费者配合电力企业降低发供电成本。1970 年，中国采用计划用电的行政办法，实现电力与国民经济发展的动态平衡，解决电力建设滞后出现的电力供应不足或严重短缺的问题，经历了行政干预电力供应配额供给、凭证用电、包干用电和国家直接分配电力的过程。随着中国经济体制改革的深化和市场经济的发展，以行政手段限制用电的办法逐步消除，峰谷电价、季节性电价等世界大多数国家采用的经济激励手段，在中国得到推广应用。20 世纪 90 年代以来，为电力消费者提供可靠的电能和优质服务，开拓售电市场，实施需求侧管理，电力营销的内涵及工作内容得到不断发展、充实与更新。

主要内容 有营销环境与市场分析、营销策略、营销方式、营销组合、营业管理、需求侧管理、供电服务等方面。

营销环境与市场分析 对营销环境及客户需求的变化特点进行分析预测并判断电力消费市场构成及潜力特点的活动。电力营销往往会受到社会环境的影响和制约，用电需求数量的增长，各类客户的用电水平和年、月、日用电负荷曲线的变化趋势，以及用电负荷的构成，都是电力消费市场的基本特征，也是影响售电市场扩大和营销目标完成的关键因素。世界上许多电力公司非常重视营销环境与市场分析预测工作，设有专人进行营销环境、市场潜力、消费者产品需求的市场前景、用电的消费心理分析及客户关系管理策略制定。营销环境与市场分析工作的基本内容有：①根据消费者对电力需求的多样性和购买行为的差异性，细分客户群体；②针对不同的客户群体进行市场调查，监视和预测电力营销环境的变化；③分析和识别因环境变化给售电市场带来的机遇和威胁；④对电力消费市场进行中、长期预测，正确选择目标对象，设计与之相适应的营销策略。

营销策略 根据电力消费市场需求及特点，为实现电力营销目标研究制定的营销方案及相应措施。制定营销策略的一般原则：①遵循市场经济发展规律，满足全社会对电力日益增长的需要，保障国民经济持续、健康、稳定发展；②坚持以市场为导向，有利于发现、改变和创造用电需求，控制和引导市场有序运作；③符合国家有关政策，引导电力资源的合理利用，有利于环境保护和可持续发展；④坚持客户至上，提供快捷满意服务。在中国，最基本的营销策略有形象营销策略、优质服务策略、市场开拓策略、推进需求侧管理策略和管理创新策略等。

（1）形象营销策略。建设企业形象，宣传服务宗旨，打造服务品牌，使电力消费者认知电力产品优质、可靠、价格合理的形象，增强对电力企业的信任感。主要方式有各种宣传媒体、服务窗口（见图 1 和图 2）、社会调查及参与社会公益活动等。



图 1 国家电网公司供电营业厅

（2）优质服务策略。以连续可靠供电、合格的电能质量、合理的销售价格、简捷的结算方式和购买手续等，提高企业信誉，增强竞争力，进而扩大电力消费市场。主要措施有增强并提高服务意识，提供多样化服务渠道及服务项目，提高供电可靠性等。

（3）市场开拓策略。落实国家能源战略，引导客户改善用能结构并合理使用电能。利用价格杠杆刺激电力消费并培育潜在的用电市场，推行可供客户选择的峰谷电价、季节性电价、阶梯电价、高可靠性电价、可中断电价等。鼓励使用有利于促进电网负荷率提高和节能减排的新技术、



图 2　中国南方电网有限责任公司移动营业厅

新产品。

(4) 推进需求侧管理策略。采用有效的激励措施，使电力资源得到优化配置。引导客户改变用电方式和时间，提高终端用电效率；加大削峰填谷和移峰填谷措施，提高电网负荷率；实施能效管理，达到节约能源和保护环境的长远目标。

(5) 管理创新策略。通过制度创新和现代信息技术，降低供电服务成本，提高并改善客户服务质量，增加社会对电力商品的信任度和依赖性，使电能成为能源消费者的首选。主要措施有改革营销业务的服务方式，优化营销流程，推行可由客户选择的电价机制，实施对电力营销与服务全过程的计算机网络化控制与管理技术等。

营销方式　电能经营的买卖方式。电力商品的销售方式有多种：①零售，习惯称为直供直销方式。供电企业对电力客户实现供电到户、抄表到户、收费到户、服务到户。②批发，习惯称为趸售供电方式。供电企业从电网经营企业趸购（批发）电能，再将电能转售给电力客户。③委托销售方式。供电企业以委托代理的方式请该地区有供电能力的直供客户向其他客户供电，以解决公用供电设施尚未到达或供电能力不足地区的电力消费需求。④直购，客户直接与发电厂签订电能购买合同，通过电网的输配电环节使用电能。电网经营企业只收取输配电费用。

营销组合　以最佳方式满足电力消费者需要并实现经营目标的各项工作和任务的集合。营销组合需要根据市场的动态变化，不断地进行调整和改善，满足不同营销环境和不同市场属性的电力消费需求，如电力品质、电力价格、促销手段、付费方式、服务保证等。只有对不同的电力消费群体或特定的对象，需要采取不同的营销组合方式并不断进行调整，才能得到合理的资源配置、合理的成本支出、最佳的社会效益和经济效益，实现预定的营销目标。

营业管理　对电能销售工作进行有目标的控制活动，是电力营销活动的重要工作内容之一。营业管理直接承担电力销售业务和日常销售服务工作，其工作内容包括受理用电申请，确立供电方式和供电方案，签订或变更供用电合同，安装、更换及维修电能计量装置，电能表抄录，电费核算和收取等。（见营业管理）

需求侧管理　为提高电力资源利用效率，改进用电方式，实现科学用电、节约用电、有序用电而开展的活动。需求侧管理的基本内容包括资源调查，选择管理对象，设置管理目标，制定政策、法规、标准，选择管理手段，制订管理计划，项目实施和项目实施效果评估等。通过管理内容与管理手段的逐步实施，力图从根本上改变人们单纯依靠增加能源供应来满足电力需求增长的传统观念，建立把节约的能源视同为供应方的一种可替代资源的新概念。世界上大多数国家的电力需求侧管理都得到了广泛应用，并取得了明显效果。（见需求侧管理）

供电服务　以提高供电客户满意度为目的的活动。世界各国的电力企业都以提供方便、快捷、有效的供电服务为目标，为不同的电力消费群体提供售前、售中、售后的全方位客户服务。中国的电网企业着力提升供电服务品质，制定了供电服务标准，在服务渠道、服务方式、服务内容、服务流程等方面推出了一系列举措，并建立了全国统一的 24 小时供电服务热线（见图 3）和供电服务评价体系。（见供电服务渠道、供电营业厅、供电服务热线、网上供电营业厅、供电服务项目）



图 3　24 小时供电服务热线

dianli yingxiao xinxihua

电力营销信息化　(informatization for electricity marketing)　利用现代信息技术推动传统电力营销管理活动发生变革的过程。这既是信息技术应用的进程，也是电力营销活动发展的进程，信息化的过程实质上是生产力（生产技能与生产工具）的发展和生产关系（管理流程和组织机构）的变革。电力营销信息化的实质是以先进的管理思想与计算机、通信、网络等技术相结合，通过对电力营销活动的组织、管理、流程、技术等方面的变革和提升，实现营销资源的优化配置、业务流程的整合规范，运营数据的处理、监控、分析及营销决策的辅助支持，从而大幅度提升电力营销工作效率和管理水平，使电力营销的组织决策、企业行为和社会运行逐步趋于合理化、规范化、标准化。随着信息技术和电网技术的不断发展，电力营销信息化将向创新应用、深度应用和互动应用发展，成为智能电网建设、智能用电服务的重要组成部分。

中国的电力营销信息化起步于 20 世纪 80 年代初，从对大用户电量电费计算的单项应用、单机运行，逐步发展到以供电营业所、地市级供电企业、省级供电企业为主导的，具有营销基本业务处理能力的业务支持系统。经过 20 多年的建设发展，在营销抄表核算收费、电能计量等基础业务管理和客户服务等方面基本形成满足业务运作和管理需要的系统化、网络化的信息系统。21 世纪，随着信息化应用技术的不断发展，电力营销信息化在实现营销业务处理效率化向业务管理信息化转变、从用户信息资源收集向营销信息资源共享转变，从支撑业务管理向提升服务质量和效益转变的同时，开展并推动了供电企业营销组织模式、营销业务制度、营销管理流程、营销信息化系统等方面的标准化设计和建设工作，并逐步形成了不受时间与空间限制，基于互联网的多技术集成，覆盖各层次营销组织和营销活动全过程的电力营销信息化系统，实现了电力营销和客户服务全过程的业务流

程及信息产生、存储、处理、传递的计算机控制与管理，并由支持基础的业务应用向实现高端的业务分析、监控及辅助决策应用方向拓展。

中国的电力营销信息化主要包括：促进营销业务规范及管理流程优化，推动营销组织模式调整优化，实施营销信息化系统建设。

促进营销业务规范及管理流程优化　营销业务及管理流程是开展电力营销活动的基础。实现电力营销信息化的过程，首先是从规范营销业务开始的。即：清晰定义营销业务内容和范围，将业扩报装、电费管理、电能计量管理、需求侧管理、客户服务等业务领域进行细分和逻辑归类，合理搭建营销业务架构并明晰各类业务领域间的逻辑关系，形成标准化的营销业务体系。其次，运用计算机技术实现业务操作并处理业务流程全过程，以提高工作效率，解放劳动生产力。再次，在提高工作效率的基础上，运用计算机、通信和网络技术，对传统的营销业务流程进行改造优化，精简业务操作和管理层级，整合工作岗位分工，使业务处理流程更加高效、便捷、安全并符合用户需求和企业内部管理要求，以提高工作质量和管理水平。最后，对营销业务流程的关键指标进行量化并形成管理要求，以信息化技术实现对营销业务流程的监控、预警、分析等管理职能。

推动营销组织模式调整优化　营销组织模式是开展电力营销活动的基本保障。以信息化推动电力营销组织模式的变革，主要体现在：①推动专业化管理。以信息技术创建支持面向用户服务的业务流程平台，按专业化管理和客户服务要求，调整优化营销基层组织架构，初步解决营销资源分散、效率偏低的问题，使营销与服务的质量和效率得到优化提升，与用户的交互接口更合理、更便捷。②推动集约化管理。依托信息技术平台，以扁平化营销业务组织模式缩短管理链条，以集约化体现规模效益，使营销资源和信息的共享程度得到优化提升。③推动协同运作。数据中心、数据仓库、数据集市技术的应用，提供了跨业务部门信息共享的技术支撑，电费账务与财务部门的信息共享，事故抢修与配电部门的信息互动，促进了跨部门业务的协同化运作。

实施营销信息化系统建设　营销信息化系统是开展电力营销信息活动的技术支撑平台。其建设目标是构筑城乡一体化的营销管理与客户服务集成平台，以营销业务及信息的纵向贯通、横向集成，实现“营销信息高度共享，营销业务高度规范，营销服务高效便捷，营销监控实时在线，营销决策分析全面”。营销信息化系统按照业务架构、应用架构、数据架构、技术架构进行整体设计和建设。

（1）业务架构。从营销业务体系出发，结合最佳实践和发展趋势，以业务的全面覆盖为目标，经过从实际到理论的抽象提炼，注重整体性、关联性和可实现性，创建营销业务体系。①构建业务逻辑关系。将客户服务、电费管理、电能计量及信息采集、市场及需求侧、综合管理定义为电力营销的5个业务域。以业务域包含业务类、业务类包含业务项、业务项包含业务子项的树状结构建立业务模型。②设计业务模型。定义业务范围、业务结构、业务内容、业务流程、业务规则和业务要求等内容，清晰内外部业务界面、纵横向业务关系、操作过程中的关键点、执行的法律政策与标准、考核约束和质量控制等业务模型内涵。

（2）应用架构。从使用者的角度出发，以功能专业化和模块化、分层级和一体化应用为目标，创建营销信息系统应用架构。①应用层次划分。按营销业务的应用特征，将应用架构划分为管理决策层、业务处理层、服务接入层和采集监制层，并将相应的功能模块按其属性分布到各层次中。②注重功能融合。清晰准确定义各模块功能及处理约束，每层功能完整，层间功能融合，应用耦合度、集成度高。③集中部署模式。根据使用对象、外部接口、网络环境等因素，统一设计业务组件和软硬件平台，采用集中部署的应用模式。电力营销信息系统应用架构见图1。

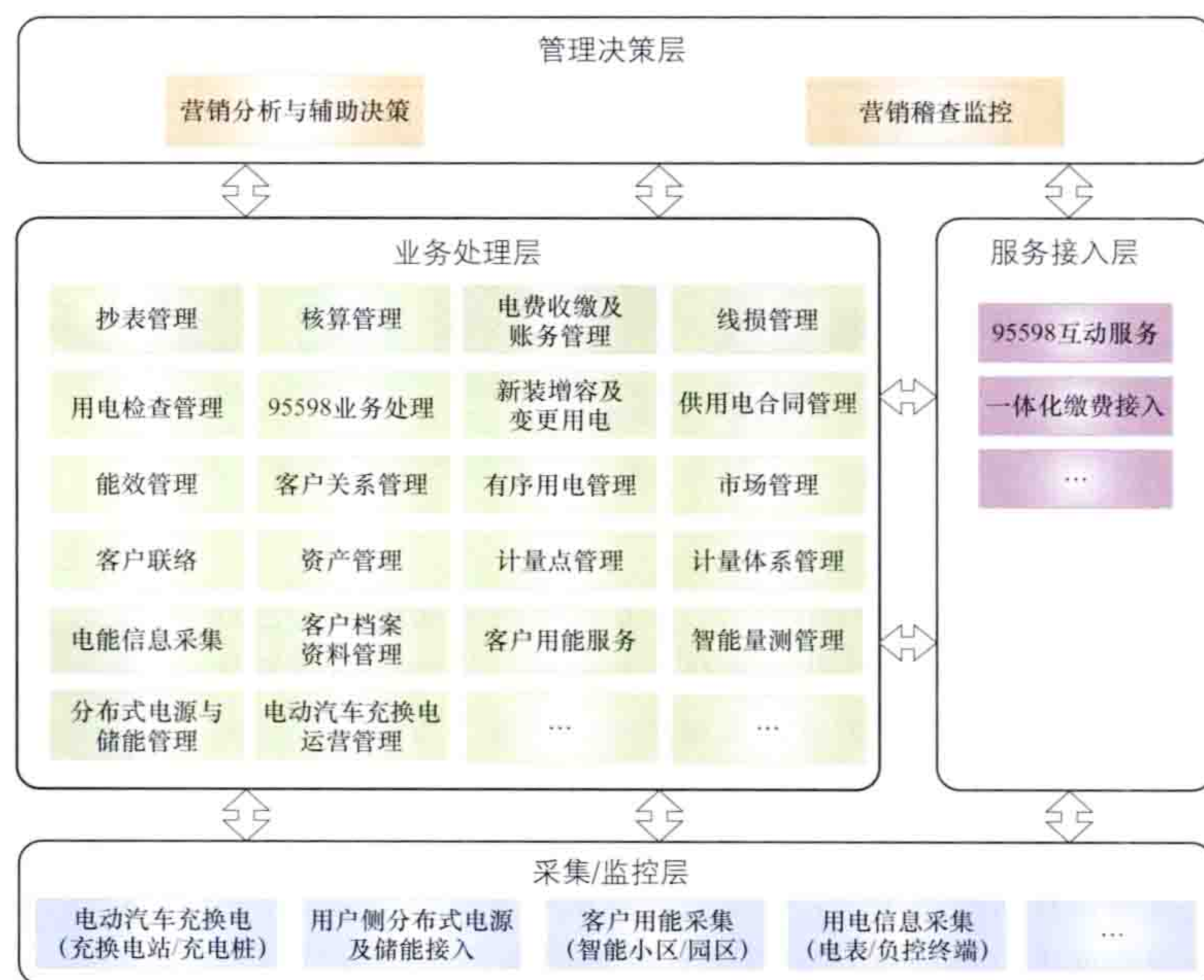


图1　电力营销信息化系统应用架构

（3）数据架构。从数据实现的角度出发，以数据模型完整、数据分布合理、数据流转高效为目标，创建营销信息化系统数据架构。①数据模型设计。遵循企业数据模型要求，借鉴IEC CIM模型设计，抽象营销业务概念和数据关系，按照域、主题、实体、属性、关系的结构建立营销数据模型，保证数据的统一、完整和唯一。②数据部署设计。按照数据分类和数据量规模，依托数据中心规划，完成数据分布、数据流转、数据安全设计，包括数据容灾与备份的实现。

（4）技术架构。从系统建设的角度出发，充分考虑技术发展和未来趋势，采用面向服务SOA的设计理念，创建营销信息化系统技术架构。①逻辑分层。基于统一的技术平台，按照采集接入、数据资源、业务处理、服务集成、信息展现进行系统分层，提升系统的横向、纵向伸缩能力。②组件技术。采用组件/构件技术，通过高内聚、松耦合的组件设计，实现交互过程与业务逻辑的分离。③柔性扩展。整体采用模块化/插件化，实现模块之间采用标准、通用的交互规约，满足未来业务的柔性扩充。电力营销信息化系统技术架构见图2。

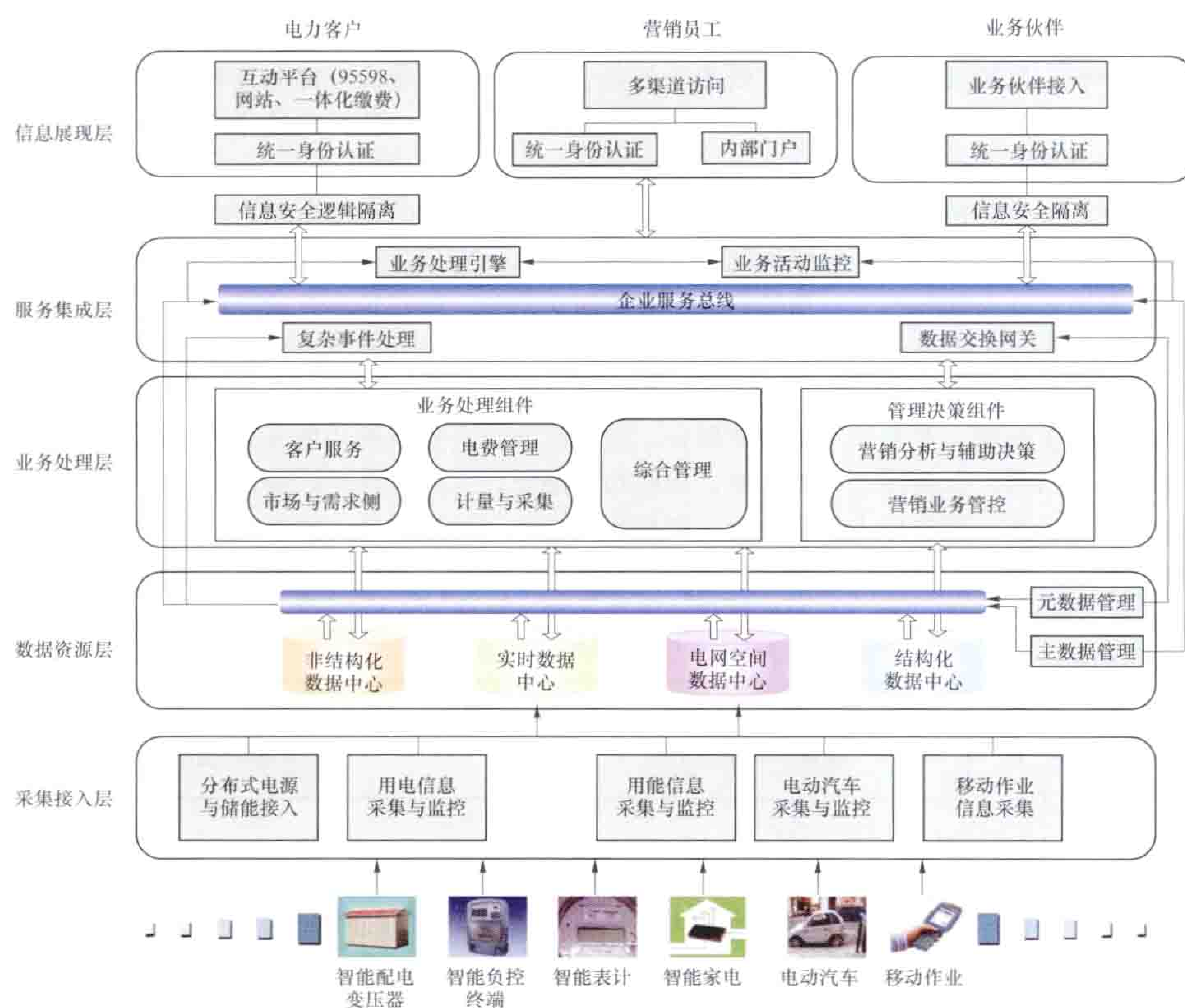


图2 电力营销信息化系统技术架构

dianlu

电炉 (electric furnace) 用电加热实现预期工艺目的，如物料的冶炼、熔化、加热、热处理、烧结、烘干等具有炉室的电热设备。炉室常为加热室、炉膛、坩埚等，是由耐火材料和绝热材料筑成的封闭或部分封闭的工作空间，在其内电能转变成热能并加热物料或进一步完成其他预定的工艺过程。在实际使用中，电炉往往与电热装置通用，泛指由有炉室或无炉室的电热设备及其机电附属设备组成的成套装置。

电炉是在19世纪70年代有了直流发电机以后逐渐发展起来的。一些常用的电炉，如一般电阻炉、炼钢电弧炉、埋弧炉、有心感应熔炼炉等，在19世纪八九十年代就已有了雏形。20世纪二三十年代，随着镍铬合金、三极电子管等的问世，特别是电力工业的发展，上述电炉开始在工业中得到推广应用，并且还发展了中、高频感应熔炼炉，近红外炉，简单的控制气氛电阻炉等。四五十年代，随着冶金、机械、航空、原子能等工业的发展，炼钢电弧炉开始向大型化（容量在50t以上）方向发展，感应透热装置、感应淬火装置得到推广应用，并出现了工频无心感应熔炼炉、真空电弧炉、电子束熔炼炉、等离子熔炼炉、微波炉、电渣重熔炉等新型的电加热设备。60年代，炼钢电弧炉开始向高功率、超高功率的方向发展，同时发展了用于钢液炉外精炼的钢包精炼炉；控制气氛电阻炉和真空电阻炉得到进一步发展和普及；由于电力半导体器件的问世，中、高频感应炉得到更大的发展；远红外炉、激光电热装置等得到了实际应用。80年代，直流炼钢电弧炉开始在工业上得到推广应用。90年代，连续加料并预热炉料的电弧炉、双炉壳交流或直流电弧炉和高阻抗交流电弧炉相继开发并得到推广应用。21世纪以来，各类电炉在结构、性能、自动化控制以及加工工艺上进行了大量改进和技术开发，如连续废钢加料的竖炉等。电炉的应用领域不断扩大，正在向节能、环保、高性能、智能化的方向发展。

中国于20世纪50年代开始生产电炉，早期是小型电阻炉、中频感应炉、炼钢电弧炉等。60年代发展了控制气氛电阻炉和真空电阻炉、真空电弧炉等。七八十年代炼钢电弧炉单台容量发展到75t（见图1），并制成连续式气体渗碳炉、离子氮化炉、真空淬火炉、微波炉、晶体生长炉、远红外炉等。90年代，40t直流炼钢电弧炉、250t LF型钢包精炼炉相继开发并投入工业运行。进入21世纪后，相继生产了100t以上电弧炉（见图2和图3）、260t和300t LF型钢包精炼炉、双加热工位的210t和230t LF型钢包精炼炉。随着中国废钢资源的逐步增加，在未来5～10年炼钢电弧炉将会沿着节能、大型、高效方向发展。

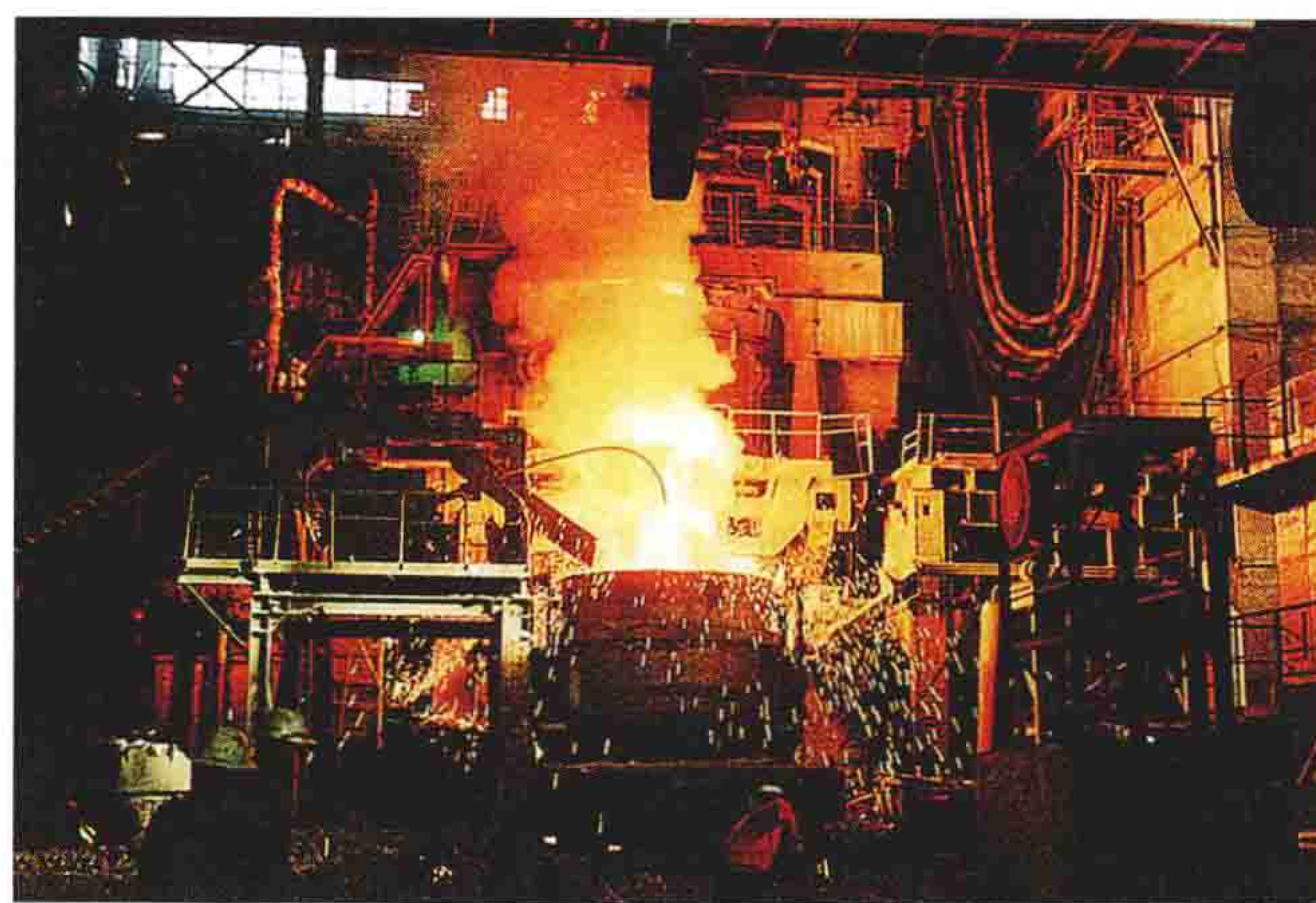


图1 75t交流炼钢电弧炉（陈留根 提供）

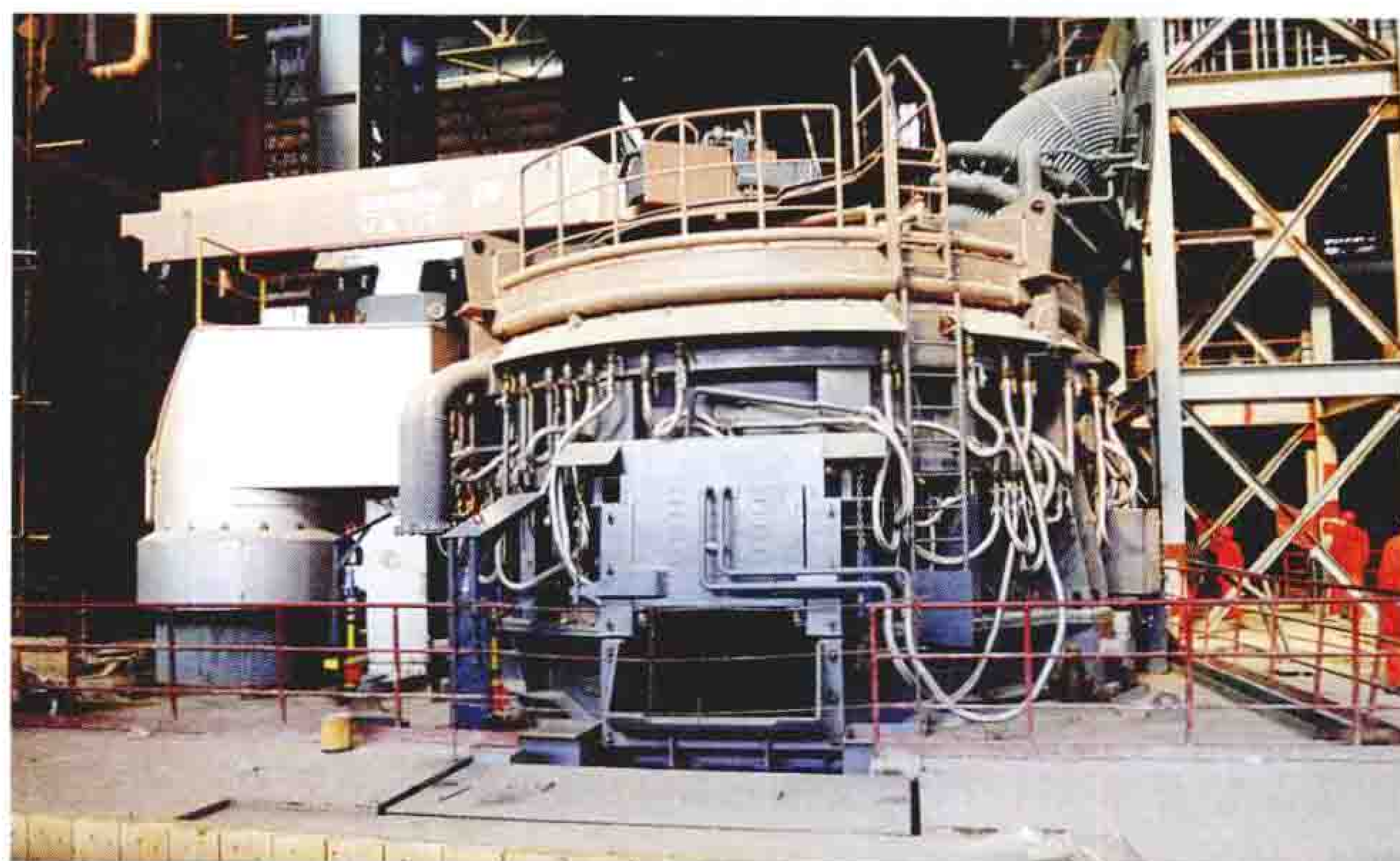


图2 110t电弧炉



图 3　220t 电弧炉

dianlu bianpin dianyuan

电炉变频电源　(frequency converter for electric furnace)　将公用电网的频率和电压变换为电炉所需频率和电压的成套电源装置。电炉变频电源与电网连接，将从电网取得的电能，经过逆变，以设备需要的频率和功率供给感应炉、电磁搅拌装置，以及特殊需要的埋弧炉和电渣重熔炉等。

公用电网的频率称为工频，中国和多数国家为 50Hz，美国、日本等少数国家 60Hz。国际电工委员会（IEC）标准规定，低于工频的称低频，高于工频但不超过 10kHz 的频率习惯上称中频，超过 10kHz 的则称高频。另外，30～70kHz 的频率有时称超音频。

在中国，用于电炉的中频额定频率系列为 150，400，1000，2500，4000，8000，10 000Hz；电压系列为 375，500，750，1000，1500，2000，3000V。

分类　电炉变频电源主要分为低频电源、旋转变频机、电子管高频电源、三倍频电源、晶闸管中频电源，电力晶体管中、高频电源等，见表。

电炉变频电源分类和应用

电源名称	频率范围	单机容量	效率	用　途
低频电源	＜50（或60）Hz	～10MW	0.85～0.92	埋弧炉、电渣重熔炉、电磁搅拌装置
旋转变频机	0.4～10kHz	～2200kW	0.7～0.89	中频感应炉（用于熔炼、透热和淬火）、中频焊接设备
电子管高频电源	10kHz～70MHz	～2000kW	0.6～0.7	高频感应炉（主要用于淬火和熔炼）、高频焊接设备，1MHz 以上者用于介质加热
三倍频电源	150（或180）Hz	～2000kW	0.7～0.8	中频感应炉（主要用于熔炼和透热）
晶闸管中频电源	100Hz～8kHz	～30 000kW	0.8～0.95	中频感应炉（用于熔炼、透热和淬火），中频焊接设备
电力晶体管中、高频电源	0.1～400kHz	2.5～3000kW	0.85～0.95	中、高频感应炉（主要用于淬火和熔炼），中、高频焊接设备

注：表中给出的单机容量为已达到的最大容量。

低频电源　早期有用低频交流发电机的，现多用晶闸管变频电源。

旋转变频机　由笼型感应电动机和中频发电机组成，通常两者同轴，以立式为多，电动机在下，发电机在上。发电机主要有旋转磁极式和感应子式两种形式：旋转磁极式与同步发电机类似，转子上设有励磁绕组和磁极，定子上设有中频绕组；感应子式直流励磁绕组和中频绕组都设在定子上，转子表面沿圆周方向形同齿轮，但没有绕组。发电机转子旋转时，利用中频绕组磁路磁阻的变化而获得中频电压。感应子式在结构上容易获得较高输出频率，机械强度好，适宜于高速旋转，用得较普遍。

20 世纪 60 年代以后旋转变频机逐步被晶闸管中频电源代替，只在要求输出频率固定或要求容许负载过载时（如对许多随意运行的并联负载供电）或对电源运行可靠性非常高时才使用。

电子管高频电源　以电子管振荡器为主制成的高频电源。电子管振荡器的激励方式有自励和他励两种。用于感应炉的高频电源，其输出频率在 10～500kHz 范围内，实际使用的多为 100～450kHz，一般为自励式，即通过感应器和电容器组成的振荡电路的反馈进行激励。反馈线路有许多种，图 1 所示的是其中的一种。他励式用于频率较低时的某些特殊情况。用于介质加热的高频电源，其输出频率在 1～70MHz 范围内，但为避免对无线电通信的干扰，要优先选用 (13.50±0.007) MHz、(27.12±0.163) MHz 和 (40.68±0.020) MHz 三个频段。振荡器用他励式。这种电源早在 20 世纪 30 年代就已用到工业上，但其效率低、冷却要求高，其中容量较小、频率低于 400kHz 者正在被晶体管中、高频电源替代。

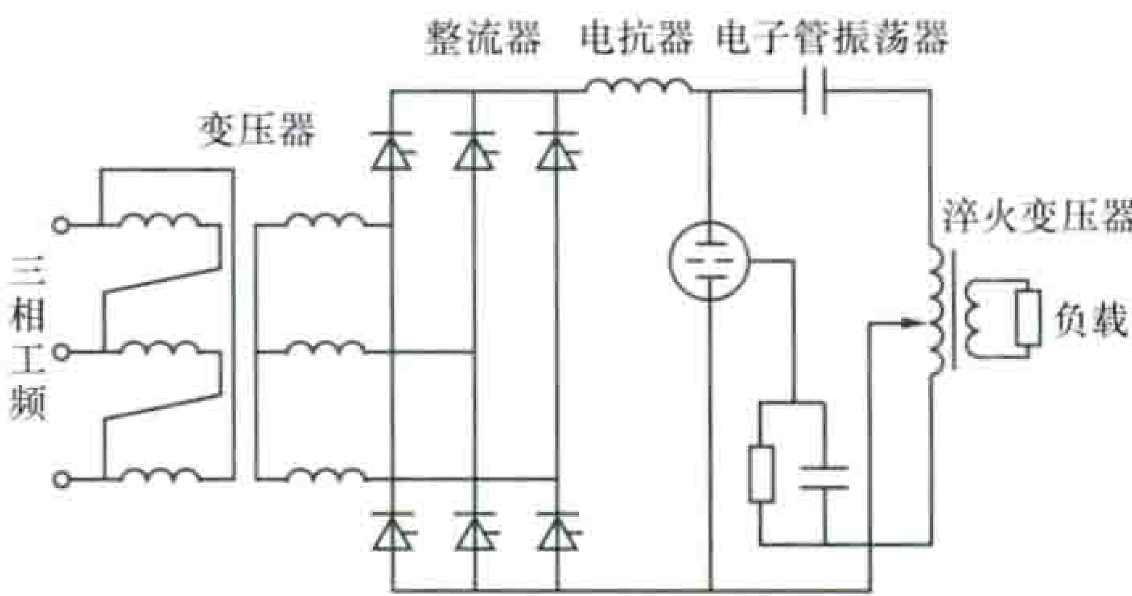


图 1　电子管高频电源的主电路

三倍频电源　其主体是三倍频器。三倍频电源是一种利用铁芯饱和产生并分出三倍频电流的电源设备，有电抗器式和变压器式两种（见图 2），所接的电容器用来补偿功率因数，电抗器式三倍频电源的补偿电容器还通过三倍频电流。

与旋转变频机比，三倍频电源无转动部分，维护方便，但功率因数低、效率低，因此曾在中频感应加热方面得到有限应用。根据类似原理通过饱和铁芯的不同组合可以制成 5，7，9 倍等倍频电源，但效率更低，未获实际应用。

晶闸管中频电源　将电网输入的工频整流为直流，再将

直流使用晶闸管作为功率开关转变为中频输出的电源。根据感应器与补偿电容器的连接方式区分为并联晶闸管逆变电源或者串联晶闸管逆变电源，其主电路拓扑图见图3。串联型电源相对于并联型具有三项工频输入端功率因数高，反馈到电网的谐波小，以及易于实现一套电源向多台炉子同时供电并可以无级分配功率等优点。与旋转变频机相比，该中频电源有质量轻、体积小、效率高、输出频率能自动跟踪负载的变化（负载变化时，输出频率自动变化，不需要改变变压器和电容器的抽头连接）、起动停止快、噪声小、维修和安装方便等优点，因此自20世纪60年代问世以来发展迅速，已经取代了旋转变频机，并促进了中频感应加热的发展、推广与应用。

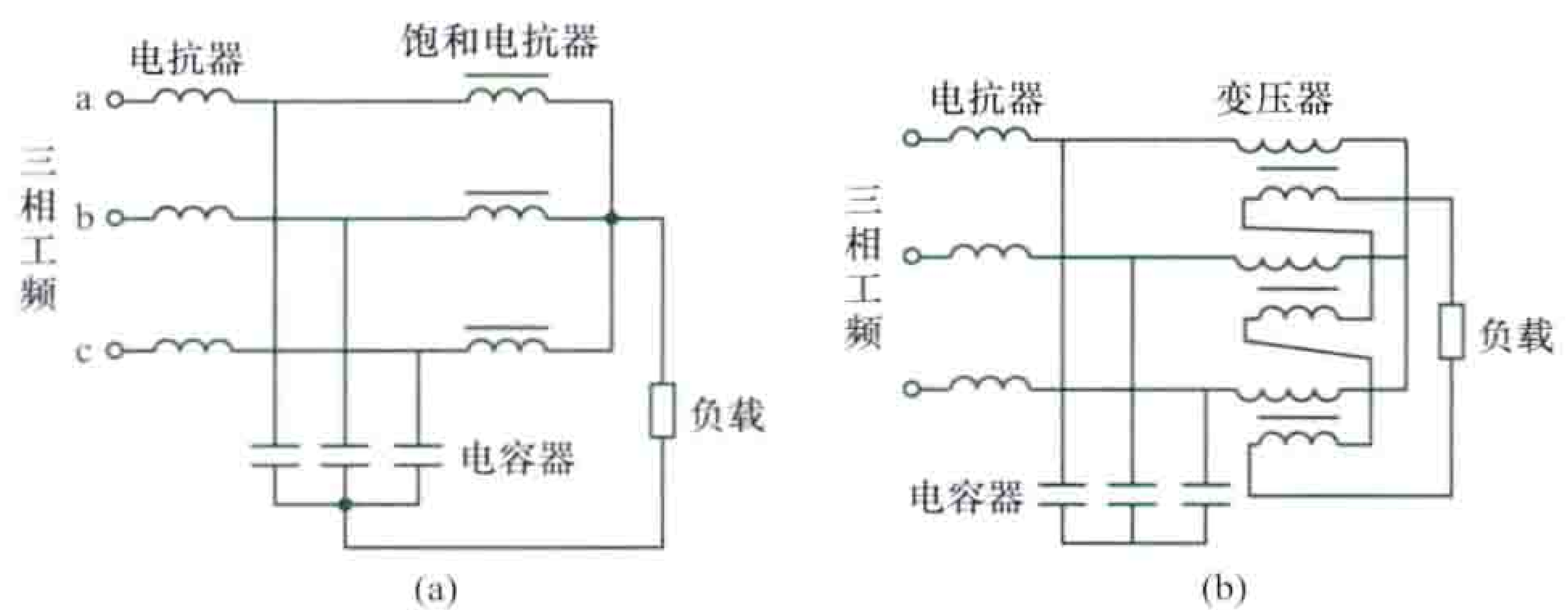


图2　三倍频中频电源主电路
（a）电抗器式；（b）变压器式

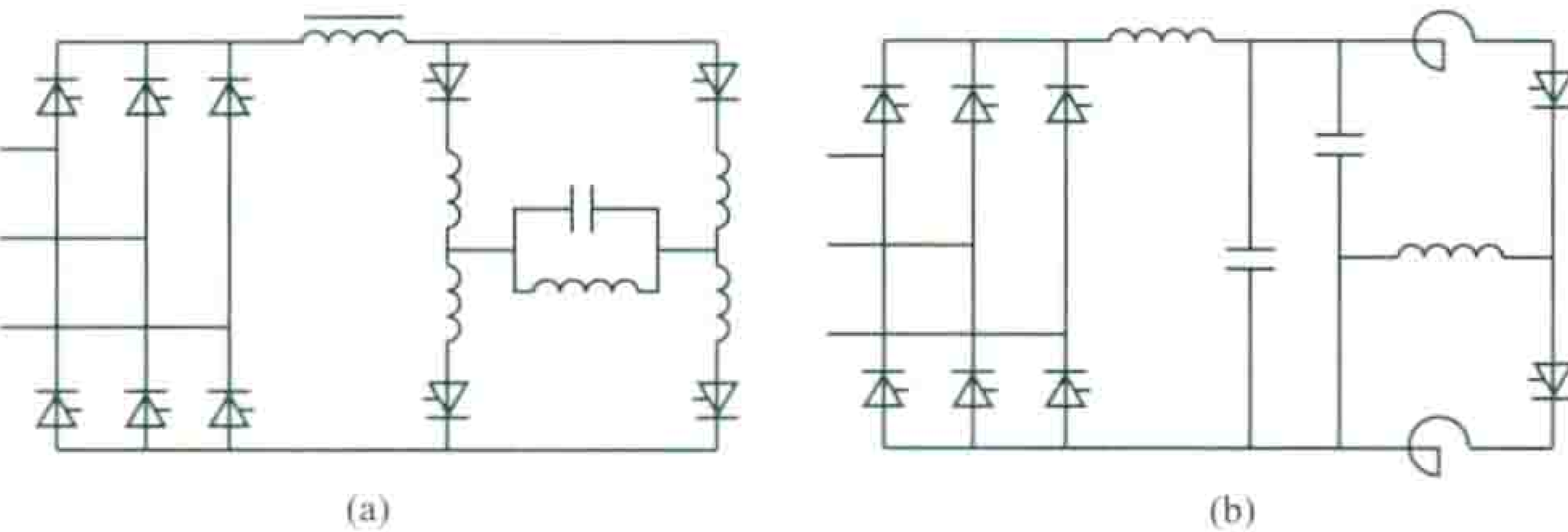


图3　晶闸管中频电源的主电路
（a）并联主回路；（b）串联主回路

电力晶体管中、高频电源　用开关频率更高的全控性电力电子器件绝缘栅双极型晶体管（IGBT）或场效应晶体管（MOSFET）作为逆变器开关器件的中、高频电源。它们和晶闸管中频电源相比具有运行频带宽、能源转换效率高、噪声低等特点，此类电源也能自动跟踪负载的变化。为便于调节输出功率，主电路采用负载感应器和补偿电容器串联的形式，见图4。

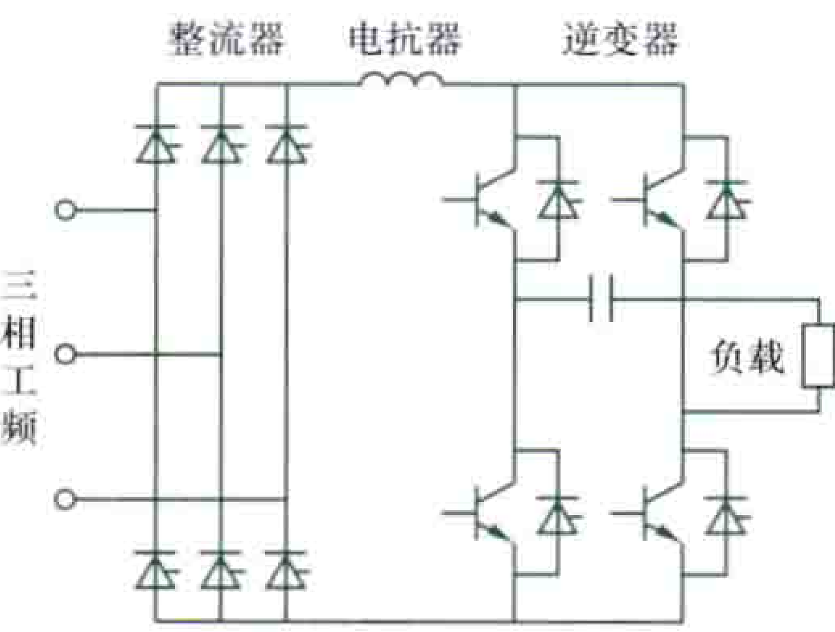


图4　晶体管中、高频电源的主电路

展望　电炉变频电源未来的发展趋势一是应用范围进一步拓宽，透热、熔炼、淬火、焊接均可以使用感应加热手段来进行。二是输出功率将不断提高。熔炼方面，已经有最大40MW的电炉变频电源生产，功率密度已达900kW/t。

dianlu bianyaqi

电炉变压器　（electric furnace transformer）　将公用电网的电压变换到电炉所需电压的变压设备。电炉变压器是电炉的主要配套设备，电炉通过它接到电网上，从电网取得电能。

除少数用电热合金作加热元件的电阻炉外，多数电炉的工作电压低于为其供电的电压，而且在电炉运行的不同时期需要调节电压来调节输入功率，所以电炉变压器是一种为满足电炉运行要求而特殊设计的降压调压变压器。

表中给出了电炉变压器的分类及特点。电弧炉变压器是电炉变压器中最主要的一类。它多为油浸式，大型变压器均采用强迫油循环水冷或风冷。

电弧炉变压器结构　电弧炉变压器在结构上与电力变压器相似，因为二次电流大而且波动剧烈，所以绕组和引出线要特别坚固。铁芯大多数为心式，少数为壳式。壳式电弧炉变压器的阻抗电压可以做得很小，占主电路总阻抗的3%～4%，而心式电弧炉变压器的则很难做到小于6%～7%。心式电弧炉变压器大多数采用同心式绕组。与电力变压器相反，它的高压绕组靠近铁芯，低压绕组套在高压绕组外。大型心式电弧炉变压器有时也采用盘形绕组。壳式电弧炉变压器采用盘形绕组，每个高压和低压绕组都做成一个盘形，一层隔一层交替地串在铁芯上。

电炉变压器分类及特点

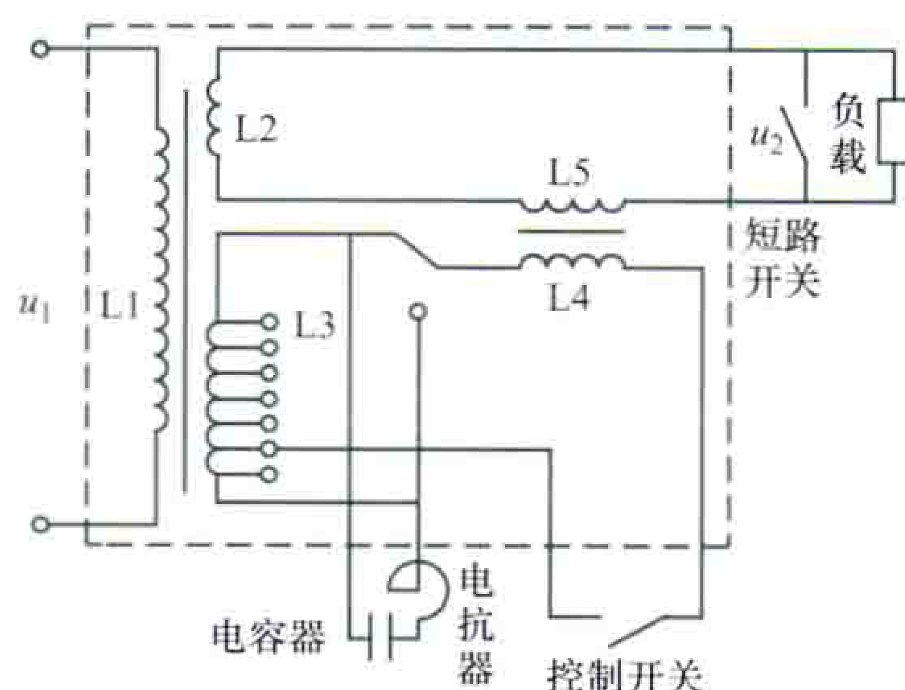
分　类		特　点
电弧炉变压器	三相交流炼钢电弧炉变压器	①容量在0.4～300MV·A范围内；②容许在一定的时间内过载20%；③最高二次电压为200～1300V，最低二次电压为最高二次电压的1/3～1/2；④调压级数：小容量有5级，中、大容量者可达20级或更多；⑤二次额定电流达数千安至数万安，运行时有短路、断路情况发生，电流波动剧烈，短路电流一般限定在额定电流的3倍以下；⑥某些电炉变压器在电炉熔化期需要增加电抗，在一次侧线路上串联电抗器，用以限制短路电流和稳定电弧
	直流电弧炉变压器	①为整流变压器，容量在10～180MV·A范围内；②二次电压调节范围大，但调压级数比三相交流炼钢电弧炉变压器的少；③二次侧电流大，达数万安培；④过载能力强，能够耐受过负荷电流冲击及操作过电压的冲击；⑤能耐受谐波电流分量引起的附加涡流损耗和局部过热；⑥二次绕组采用多相式布置及出线方式，以适应6脉波或12脉波整流装置的要求；⑦大容量变压器多采用双铁芯结构
	埋弧炉变压器（见埋弧炉）	①多数为三相，少数用3台单相变压器组合为三相；②容量在3～100MV·A范围内；③最高二次电压比同容量的炼钢电弧炉变压器低；④调压级数：小容量者4～6级，大容量者可近30级；⑤二次额定电流比同容量的炼钢电弧炉变压器大，但运行时短路、断路情况很少，负载平稳
	钢包精炼炉变压器	①容量不超过50MV·A；②最高二次电压比同容量的炼钢电弧炉变压器的低；③调压级数为7～15级；④二次额定电流比同容量的炼钢电弧炉变压器的大，但运行时不常发生短路，短路电流较小

续表

分类		特点
电阻炉变压器	间接电阻炉用变压器（主要用于采用碳化硅、二硅化钼、石墨、钨、钼等加热元件的电阻炉）	①容量在10～1000kV·A范围内；②多数为干式，由380V低压配电网供电，个别容量较大的变压器由6～10kV配电网供电，并做成油浸式的；③调压级数为5～10级，或另配磁性调压器无级调压；④负载平稳
	电极盐熔炉变压器（见电热浴炉）	①容量一般不超过500kV·A，干式；②二次电压为5.5～17.5V的，用于插入式电极盐熔炉，11～35V的用于埋入式电极盐熔炉，分5～8级调压；③负载平稳
	电渣重熔炉变压器（见电渣重熔炉）	①容量在0.5～20MV·A范围内，多数为单相油浸式，也有用三相或整流变压器的；②最高二次电压随变压器容量变化，约为40～130V；③调压级数为5～20级；④负载平稳
	石墨化电炉变压器和碳化硅电炉变压器（见直接电阻加热装置）	①容量在2～25MV·A，单相，油浸式；②一台变压器可轮流为几台电炉供电，提高设备利用率；③最高二次电压约为120～300V，调压级数在10级以上；④负载平稳
感应炉变压器	工频感应炉变压器	①容量在0.3～6MV·A。②最高二次电压为200～3000V，调压级数为5～10级。③负载平稳。④有两种接线方式，一种是三相变压器，其二次侧的一相为电炉供电，其余两相分别接平衡电抗器和平衡电容器，使一次侧三相平衡；另一种是T型接线，以其两相输出为电炉供电。⑤多为油浸式
	中频感应炉变压器	①采用整流变压器；②容量在0.5～13MV·A范围内；③最高二次电压为575～1400V；④一次侧3相进线，二次侧为双绕组6相出线；⑤为适应负载要求，具有较大的短路阻抗，过载能力强；⑥多为油浸式

三相电弧炉变压器的一次绕组有三角形和星形两种连接方式，而二次绕组都接成三角形，以获得较大的输出电流。三角形连接点的位置根据短网的设计要求，可以在靠近电极处，也可以在变压器的油箱内。输出端子从油箱盖上或从油箱侧壁引出。

电弧炉变压器调压方式　包括：①在高压绕组上抽出适当的分接头调压，该调压方式调压范围较小。②自耦调压器调压，有一台单独的自耦调压器，以满足大范围多级数调压。③第三绕组调压（如图所示）。它由装于同一油箱中的两个器身组成。其一装有与电网相连的绕组 L1、输出的低压绕组 L2 以及带抽头的第三绕组 L3。其二装有高、低压绕组 L4 和 L5，分别与绕组 L3 和 L2 串联。通过绕组 L3 的分接头变换，使绕组 L4 和 L5 的端电压以及输出电压 u_2 得到改变。



第三绕组调压接线原理图

第三绕组调压方式的特点：①输出电压 u_2 成等差级数变化；②第三绕组以及有载分接开关的电压电流值可以人为地选择；③运行时第三绕组中的电流值与负载电流大小成正比，可以通过它来监视、控制负载电流；④第三绕组端子可外接补偿电容器，以提高功率因数；⑤可以实现三次开断，避免因装料、出料及故障时变压器与电网连接的高压断路器的频繁操作。当电炉要停电时，先打开控制开关，此时电炉尚有电流通过，然后合上变压器与电炉间的短路开关，此时负载电路已无电流通过，电炉可以进行装料、出料以及排除故障等工作，而接于变压器一侧的高压断路器仅仅起保护变压器的作用。

电弧炉变压器恒功率输出　炼钢电弧炉和钢包精炼炉变压器，在采用无励磁调压时，其额定容量是指在最高二次电压下的容量。而在采用有载调压时，其容量是以低于最高二次电压的某一电压作为额定电压来标定的。当变压器高于额定电压运行时，应相应地减少二次电流，但保持输出功率恒定，通常称为恒功率输出。这种输出特性对炼钢电弧炉和钢包精炼炉的操作都是有利的。

diannengbiao

电能表　(watt-hour meter; kWh meter)　实现有功功率对时间积分即有功电能测量的电表，又称千瓦时表或电度表。电能表是记录电能量的专用计量器具，用于计量某一段时间内电量累积值，单位为 kW·h，俗称度。其计量结果主要用于电能消费结算和电力生产过程中电能技术经济指标的考核。

分类　一般按电能表的电流类别、用途、准确度等级、工作原理、相数、接入方式、付款方式进行分类。

按电流类别分为直流电能表和交流电能表，分别用于计量直流电能和交流电能。

按用途分为有功电能表、无功电能表、最大需量电能表、多费率电能表、多功能电能表、标准电能表、损耗电能表等。有功电能表和无功电能表分别用于计量有功电能和无功电能；最大需量电能表用于计量一段时间内平均功率的最大值；多费率电能表用于记录不同时间段的用电量；多功能电能表既可计量有功、无功电能量，也可计量分时电量，还能测量最大需量；标准电能表是检验电能表准确度的标准器具；损耗电能表专门用于测量电能损耗比，如铜损、铁损等。

按准确度等级分为普通安装式电能表（分为 3.0，2.0，1.0，0.5S，0.2S 级），标准电能表（分为 0.5，0.2，0.1，0.05，0.02，0.01 级）。

按工作原理分为感应式电能表和电子式电能表。电子式电能表又分普通电子式电能表、网络电能表和智能电能表（见图 1 和图 2）等。

按相数分为单相电能表、三相三线电能表和三相四线电能表，分别用于测量单相系统、三相三线系统和三相四线系统的电能量。

按接入方式分为直接式和间接式（即带互感器接入式）。直接式用于电压等级相对不高的场合，间接式用于电压等级



图 1　单相智能电能表



图 2　三相智能电能表

高、必须通过互感器接入的场合。

按付款方式分为非预付费电能表和预付费电能表。非预付费电能表用于先用电后付费的电费结算方式；预付费电能表用于先预付后用电的电费结算方式，一般俗称磁卡表、电卡表等。

铭牌　每只电能表都有一块铭牌。通常铭牌上标注有名称、型号、准确度等级、标定电流和额定最大电流、额定电压、电能表常数、电能计量单位、频率、生产厂家等。三相四线有功复费率电能表铭牌见图 3。中国生产的电能表铭牌内容包括名称、型号、准确度等级、电能计量单位、标定电流和额定最大电流、额定电压、电能表常数和额定频率。

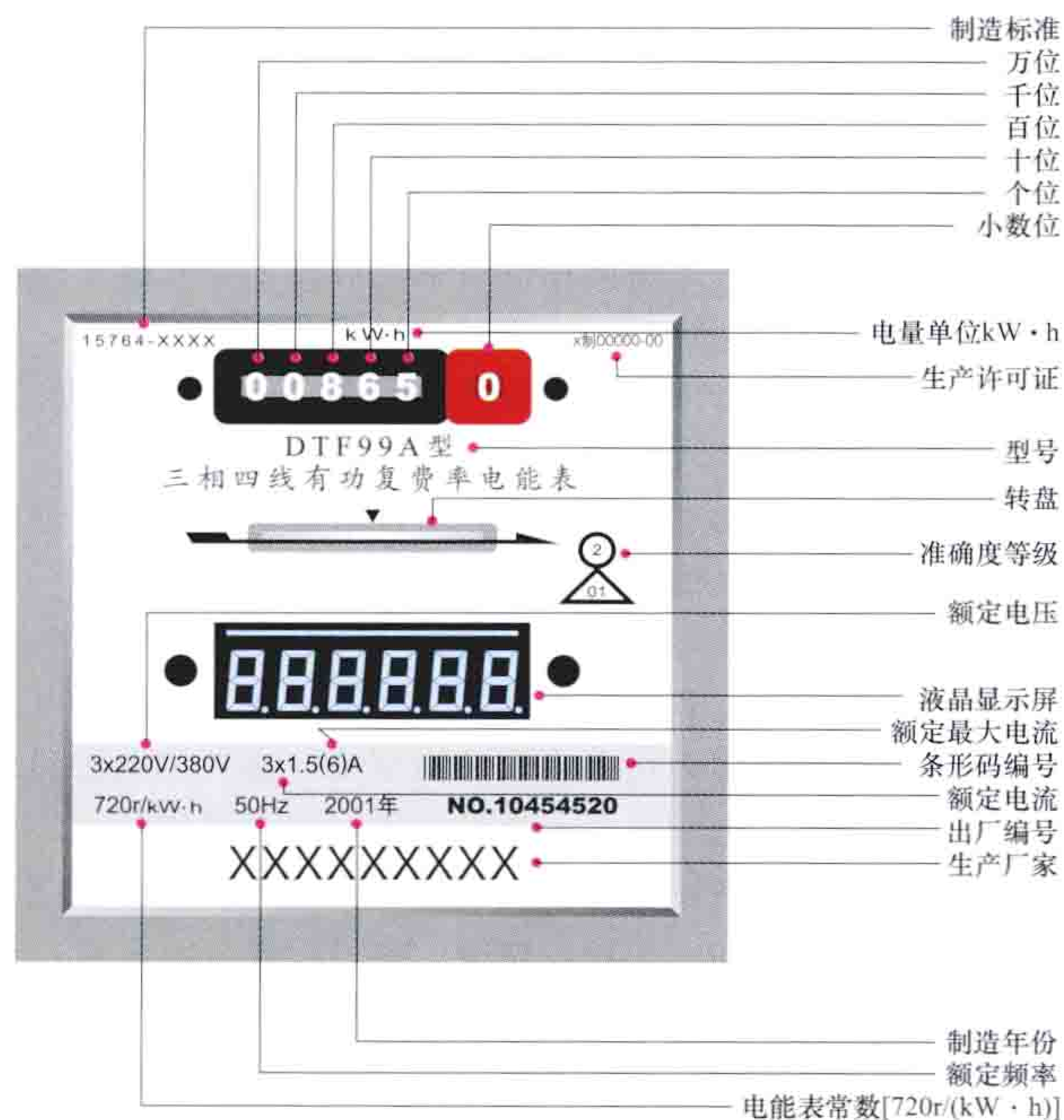


图 3　三相四线有功复费率电能表铭牌

名称　标明电能表的用途特征，如单相电能表、三相三线有功电能表、三相四线有功电能表、复费率电能表等。

型号　中国电能表型号由类别代号、组别代号、设计序号组成。

类别代号：D—电能表。

组别代号：D—单相；S—三相三线有功；T—三相四线有功；X—无功；B—标准；Z—最大需量；J—直流；S—电子式；F—复费率；Y—预付费。

设计序号：以阿拉伯数字表示。

如 DDS×××中第一个 D 表示电能表，第二个 D 表示单相，S 表示电子式，×××表示设计序号，此电能表为单相电子式×××型电能表。

准确度等级　用置于圆圈内的数字来表示，如 ⓵.⓪ 表示该表准确度等级为 1.0 级，即相对误差在 1%以内。

电能计量单位　有功电能表的计量单位为千瓦时，符号为 kW·h；无功电能表的计量单位为千乏时，符号为 kvar·h。

标定电流和额定最大电流　如铭牌上的 5（20）A，表示标定电流为 5A，额定最大电流为 20A。

额定电压　正常工作电压值　三相电能表额定电压有 3 种标注方法：3×380V，表示三相三线，额定线电压为 380V；3×380/220V，表示三相四线，额定线电压为 380V，额定相电压为 220V；3×100V，表示经电压互感器接入的电能表，电压互感器的额定电压为 100V。

电能表常数　电能表计度器的指示数和圆盘转数或输出脉冲数之间的比值，如 $K = 1500\mathrm{r/(kW \cdot h)}$，表示圆盘转 1500r 计度器将记录 1kW·h 电量；又如 $K = 1500\mathrm{imp/(kW \cdot h)}$，表示输出 1500 个脉冲计度器将记录 1kW·h 电量。



图 4　单相感应式有功电能表

额定频率　电能表的正常工作频率，如 50Hz。

工作原理及结构　电能表的工作原理分为感应式和电子式两种。

感应式电能表　感应式电能表（见图 4）的种类型号虽很多，但基本结构相似，均由测量机构和辅助部件两大部分组成。测量机构是电能表实现电能测量的核心部分，包括电磁驱动元件、转动元件、制动元件、轴承和计度器。单相感应式电能表的测量机构见图 5。电磁驱动元件包括电压元件和电流元件。电压元件由电压铁芯和电压线圈组成；电流元件由电流铁芯和电流线圈组成。转动元件由转盘（也称圆盘）和转轴组成。制动元件由永久磁铁和调整装置组成。轴承是电能表的主要元件，轴承的质量优劣对电能表的准确度及使用寿命有重要影响。计度器是供计算电能累积值用的，是电能表的指示部分。辅助部件包括基架、底座、表盖、端钮盒和铭牌。

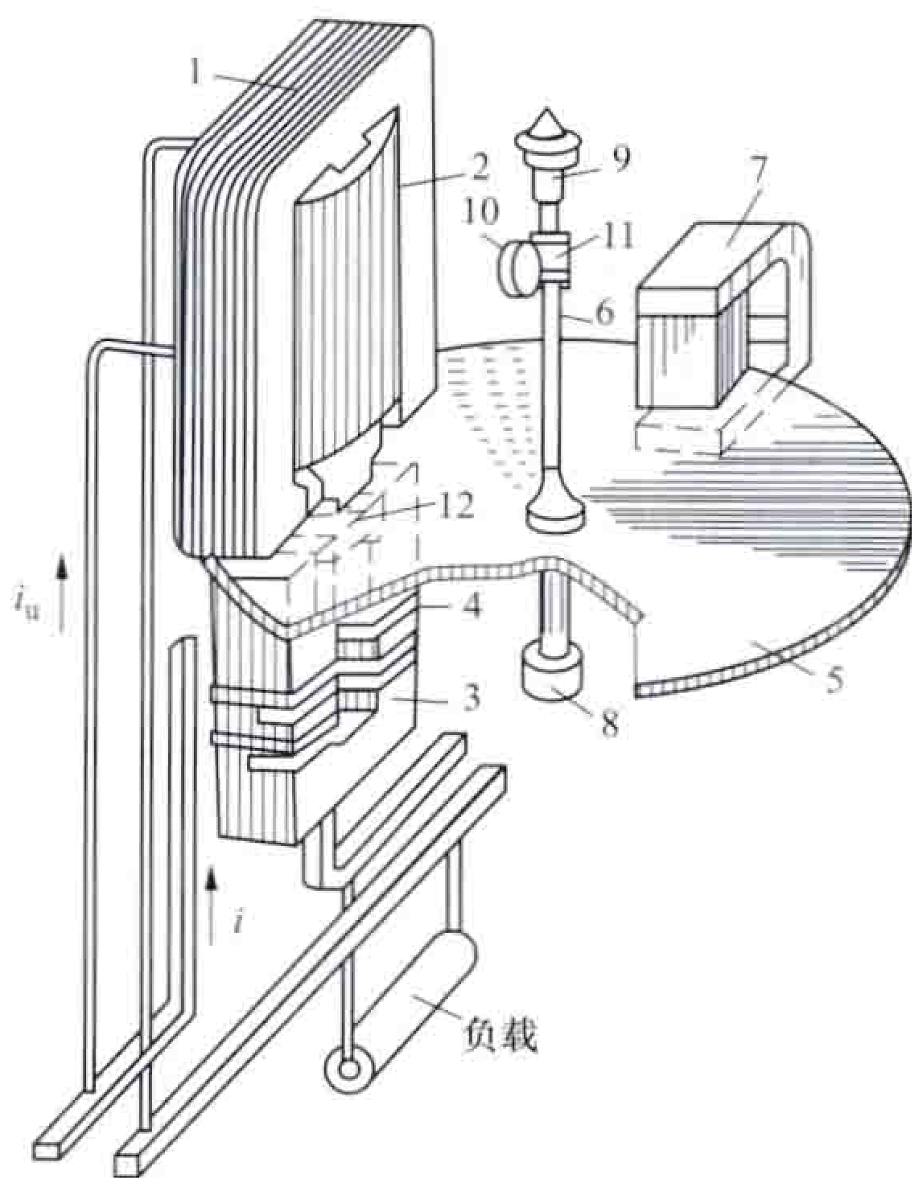


图 5　单相感应式电能表的测量机构简图

1—电压铁芯；2—电压线圈；3—电流铁芯；4—电流线圈；5—转盘；6—转轴；7—制动元件；8—下轴承；9—上轴承；10—蜗轮；11—蜗杆；12—回磁极

感应式电能表的基本工作原理是通过驱动元件的电压元件和电流元件，将交变电压和电流转变为穿过转盘的交变磁通，该磁通与其在转盘中

感应的电流相互作用，产生驱动力矩，使转盘转动。而制动元件产生的制动力矩，使转盘的转动速度与被测电路的功率成正比。把转动的圈数传给计度器，累计成电能累积值。

三相感应式电能表与单相感应式电能表内部的各组成部件基本相似，区别在于三相感应式电能表有两组或三组电磁驱动元件，它们产生的电磁驱动力矩共同作用在一个转动元件上，并由一个计度器指示三相电路消耗的总电能量。



图 6 单相电子式有功电能表

电子式电能表 如图 6 所示，电子式电能表的结构与感应式电能表相似，也由测量机构和辅助部件两大部分组成。测量机构以电子电路为主构成，它的测量元件是由 ui 乘法器、U/f 转换器和计数器构成；辅助部件与感应式电能表相同。它的基本工作原理框图见图 7，电功率 $P=ui$，电能 $W=Pt$。电子式电能表的关键部分是 ui 乘法器，采用较多的是时分割乘法器。测量电压 u 和电流 i 经电压电流采样模块，被转换成与之成比例的小电压和小电流，输入到时分割乘法器中相乘，就可得到一个与功率 P 成正比的模拟电压 U，再将 U 经 U/f 转换器转变为频率 f，根据频率计在 Δt 时间内的计数 N，便可得到这一段时间内的平均功率，而对某一段时间内的电能测量，就变为对这一段时间内所转换得到的电脉冲数作累计。电子式电能表可以做成单相的，也可以做成三相的。

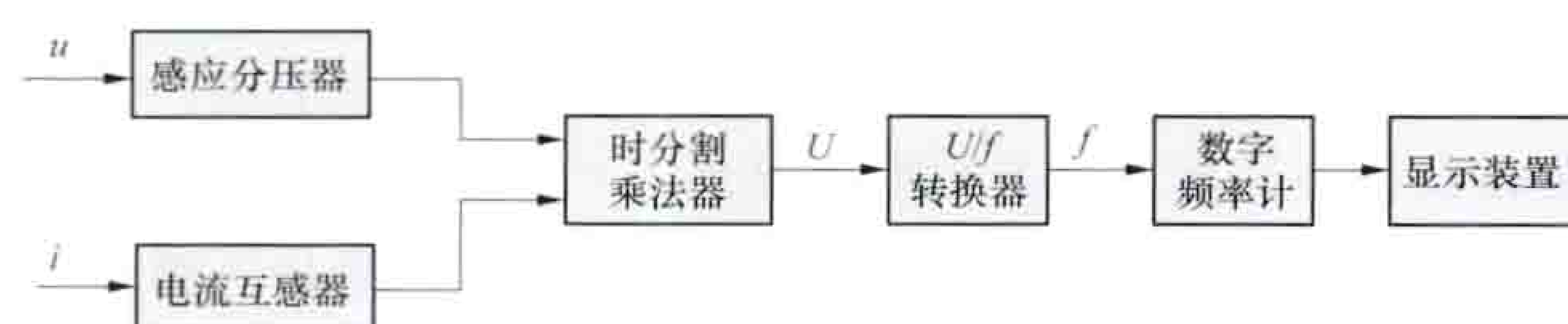


图 7 电子式电能表工作原理框图

历史与发展 电能表在世界上的出现和发展已有 100 多年的历史。世界上最早的电能表是 1880 年 T. A. 爱迪生（T. A. Edison，1847—1931，见图 8）利用电解原理制成的直流电能表（即安时计）。1885 年交流电的发现和应用使交流电能表应运而生。1889 年，德国人布勒泰制作成总质量为 36.5kg 的世界上第一块感应式电能表。从此，感应式电能表在电能计量应用中占据了极其重要的地位。20 世纪 60 年代末，日本人衫山桌发明了时分割乘法器并提出功率测量原理，实现了全电子化电能计量装置，并由日本横河株式会社生产了 2885 型数字功率变换器，受到全世界的关注。



图 8 T. A. 爱迪生

中国最早的电能表诞生在上海。1929 年，上海大华科学仪器股份有限公司制造出第一只 3 英寸直流磁电式电能表，精度 2.0 级。1950 年，上海钰华电器厂仿制英国单相电能表，总产量 1000 台左右。1952 年，华通开关厂仿制美国单相电能表，至 1953 年底共生产 1 万多台。1952 年，上海和成电器厂生产出中国第一只 2.0 级机械式单、三相电能表。20 世纪 70 年代，中国开始使用电子式标准电能表，1976 年，自主研发并生产出电子式单相标准电能表；1991 年研发出第一只安装式三相电子式电能表；1995 年批量生产第一批民用电子式电能表。之后，相继研制开发出了多种类型及规格的单相和三相电子式电能表。随着电子技术和计算机技术的飞速发展，以集成电子线路板和计算机软件程序为主要架构的电子式电能表的功能愈加丰富和强大，改变了以往一种电能表只具备单一功能的状况，在同一款表上可同时具备有无功计量、双向计量、最大需量测量、分时计费、通信、显示、数据存储、事件记录、预付费等一系列功能。电能表正逐步迈入智能化时代，开始具备实时监控、信息交互等智能化功能。

世界各国极为重视提高电能表的质量，降低制造成本，在电能表的结构、使用材料及元件等方面不断地改进，并以提高电能表的准确度、过负载能力和延长一次使用寿命作为主要指标。电能表的准确度单相可达 1.0 级、三相可达 0.2S 级，过载能力可达 400%～1200%，一次使用寿命可达 10～30 年。

diannengbiao jianyan

电能表检验 （test of watt-hour meter） 对投运前、修理后和运行过程中的电能表进行的性能测试。为了保证电能计量的准确性和可靠性，世界各国都制定了相应的技术规程或标准并据此开展电能表检验工作。电能表检验包括型式试验和常规检验。

型式试验 一般在产品设计定型时进行，要求全面完整地检测电能表性能，检验项目一般有准确度、电气性能、电磁兼容、功能、机械性能、气候影响等。

常规检验 分为首次检验、后续检验和使用中检验。首次检验在产品投运前进行，后续检验有周期检验和修理后检验，使用中检验则指在电能表安装现场开展的现场检验或将现场电能表拆回后在实验室进行的检验。常规检验的项目包括直观检查和通电检查、工频耐压试验、潜动试验、起动试验、常数试验、测定基本误差等。

直观检查和通电检查 主要检查电能表外观是否损坏，部件是否移位、松动、脱落，铭牌标志是否符合国家或行业标准的规定，通电后显示及运行是否正常等。

工频耐压试验 施以数倍额定电压以检查电能表的绝缘水平，防止漏电造成人体触电。

潜动试验 检查电能表切断负载后，在规定时间内是否依然进行电能计量，以防无载误计。

起动试验 检查电能表在起动电流下是否依然能够进行电能计量，以防低载漏计。

常数试验 检查电能表电量累计与输出脉冲之间的转换关系是否与电能表常数一致。常数试验包括计读脉冲法、走字试验法和标准表法。

（1）计读脉冲法。在参比频率、参比电压和最大电流及功率因数为 1 的条件下，被检电能表计度器末位（是否是小数位无关）改变至少 1 个数字，输出脉冲数 N 应和式（1）计算值相同，即

$$N=10^{-a}bC \quad (1)$$

式中 a 为计度器小数位数，无小数位时 $a=0$；b 为计度器倍率，未标注者为 1；C 为被检电能表常数，imp/（kW·h）或 imp/（kvar·h）。

（2）走字试验法。在规格相同的一批被检电能表中，选用误差较稳定而常数已知的 2 只电能表作为参照表。各表电流线路串联而电压线路并联，加最大负载功率。当计度器末位（是否是小数位无关）改变不少于规定数字时，参照表与其他表的示数（通电前后示值之差）应符合式（2）要求，即

$$\gamma=\frac{D_i-D_0}{D_0}\times100\%+\gamma_0\leqslant1.5\text{倍基本误差限} \quad (2)$$

式中 D_i 为第 i 只被检电能表示数（$i=1$，2，…，n）；D_0 为 2 只参照表示数的平均值；γ_0 为 2 只参照表相对误差的平均值，%。

（3）标准表法。将标准表与被检电能表同时测定的电能值相比较，以确定被检电能表的相对误差的检测方法。将各被检表与标准表的同相电流线路串联，电压线路并联，加最大负载运行一段时间。停止运行后，按式（3）计算每个被检表的误差 γ，要求 γ 不超过基本误差限，即

$$\gamma=\frac{W'-W}{W}\times100\%+\gamma_0 \quad (3)$$

式中 W' 为每台被检表停止运行与运行前示值之差，kW·h；W 为标准电能表显示的电能值（换算为 kW·h）；γ_0 为标准表的已定系统误差，不需修正时 $\gamma_0=0$。

测定基本误差　检测电能表误差是否在规定范围内，常用标准表法。一般有定低频脉冲数比较法和高频脉冲数预置法。

（1）定低频脉冲数比较法。当用被检电能表输出一定的低频脉冲数停住标准表的方法检定时，被检电能表的相对误差 γ 按式（4）计算，即

$$\gamma=\frac{W_0-W}{W}\times100\% \quad (4)$$

$$W_0=\frac{3.6\times10^6}{C_0}\times n_0$$

$$n_0=\frac{C_0N}{C_LK_IK_U}$$

式中 W_0 为算定电能值，即按被检电能表所给脉冲常数输出 N 个低频脉冲时，标准表应累计的电能值，kW·h；W 为实测电能值，即标准表累计的电能值，kW·h；C_0 为标准表的脉冲常数；n_0 为算定脉冲数；C_L 为被检电能表的脉冲常数；K_I、K_U 为标准表外接的电流、电压互感器变比。当没有外接电流、电压互感器时，K_I 和 K_U 均等于 1。

经互感器接入的电能表，若铭牌上标有电流互感器变比 K_L 或电压互感器变比 K_Y，检定这类电能表，算定脉冲数 n_0 按式（5）计算，即

$$n_0=\frac{C_0N}{C_LK_LK_YK_IK_U} \quad (5)$$

（2）高频脉冲数预置法。在标准表和被检电能表都连续运行的情况下，计读标准表在被检电能表输出 N 个低频脉冲时输出的高频脉冲数 m 作为实测高频脉冲数，再与算定（或预置）的高频脉冲数相比较，用式（6）计算被检电能表的相对误差 γ，即

$$\gamma=\frac{m_0-m}{m}\times100\% \quad (6)$$

$$m_0=\frac{C_0N}{C_LK_IK_U}$$

式中 m_0 为算定（或预置）的高频脉冲数；m 为实测高频脉冲数；C_0 为标准表的高频脉冲数，imp/(kW·h)；C_L 为被检电能表的低频脉冲常数，imp/（kW·h）；K_I、K_U 为标准表外接的电流、电压互感器变比。当没有外接电流、电压互感器时，K_I 和 K_U 均等于 1。

对铭牌上标有电流互感器变比 K_L 和/或电压互感器变比 K_Y 经互感器接入式的电能表，算定脉冲数 m_0 按式（7）计算，即

$$m_0=\frac{C_0N}{C_LK_LK_YK_IK_U} \quad (7)$$

检验周期　电能表的检验周期一般取决于各国计量检定规程或电力行业相关标准的规定。中国对电子式电能表检验周期的规定为：0.2S 级、0.5S 级有功电能表一般不超过 6 年；1 级、2 级有功电能表和 2 级、3 级无功电能表一般不超过 8 年。

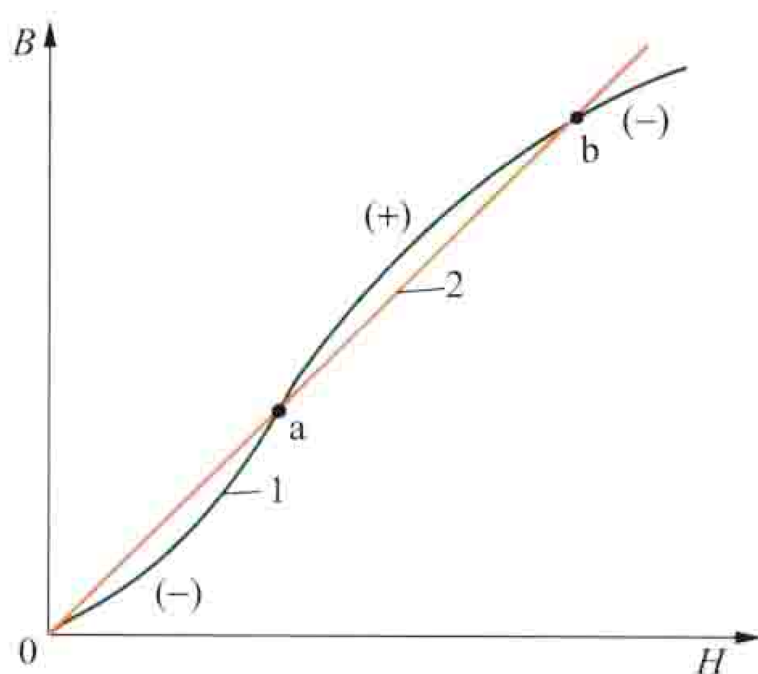
diannengbiao wucha

电能表误差

电能表误差　（error of watt-hour meter）　电能表测得的实际值与标准值之间的差值的百分数，也称电能表的相对误差。电能表在实际运行中，受制造工艺、技术水平、外界各类因素的影响，其电能计量准确度必然会与标准值有所偏离，这样就产生了误差。电子式电能表为电子线路板构造，其计量性能稳定，计量准确度优于感应式电能表。电能表误差可分为基本误差和附加误差。

基本误差　在规定的电压、频率和温度的条件下测得的误差值。

（1）感应式电能表基本误差。受抑制力矩、摩擦力矩、电流铁芯磁化曲线的非线性和补偿力矩等作用，电能表转盘转速与负载功率成正比的关系遭到破坏因而产生误差。主要因素有：①抑制力矩，又称自制动力矩，分为电流抑制力矩和电压抑制力矩。抑制力矩阻碍圆盘的转动，使电能表出现负误差。②摩擦力矩。转动元件在驱动力矩作用下旋转时，轴和轴承之间，计度器的传动齿轮之间产生的与转动方向相反的力矩。当电能表轻载时，摩擦力矩的影响相对较大。摩擦力矩阻碍转盘转动，使电能表出现负误差。③电流铁芯磁化曲线的非线性影响。如图所示，由于电流铁芯磁化曲线的非线性，当轻负载时，电能表转速降低出现负误差；负载增大时出现正误差；负载继续增大时，又出现负误差。④补偿力矩。电能表在轻载运行时，电流抑制力矩、摩擦力矩、电流铁芯磁化曲线的非线性影响都引起负误差，在电能表中加装轻载调整装置，以补偿上述因素引起的负误差。此外，转盘位置的倾斜，驱动元件安装位置不正确等因素，也会



电能表电流铁芯磁化曲线
1—实际磁化曲线；
2—理想磁化曲线

影响电能表的基本误差。

(2) 电子式电能表基本误差。实际运行中，受电子器件质量或外部影响量的干扰，电能表采样回路或乘法器、计量芯片失准而产生误差。主要因素有：①电流采样误差。电流采样器分为分流器和电流互感器。分流器多采用锰铜合金板，温度系数小，电阻随温度变化而发生非线性变化，从而产生误差；电流互感器产生的误差与一次回路电流、二次负载和工作频率等因素有关。②电压采样误差。电压采样器分为分压器和电压互感器，误差与温度、一次电压、负载和工作频率相关。③乘法器或计量芯片误差。乘法器或计量芯片一般由大规模集成电路构成，输入信号的非线性变化、A/D转换误差、输入频率变化、温度变化等因素都会引起计量失准而产生误差。

附加误差　电能表在运行中，受电压、频率和温度等外界条件变化，以及电能质量、负荷特性等影响而产生的误差值。

(1) 感应式电能表附加误差。主要因素有：①电压影响。当加于电压线圈两端的电压发生变化时，将引起电压铁芯中磁通的变化，并且在这些磁通的路径上，涡流损耗和磁滞损耗也随之变化，致使电压磁通的大小及与工作磁通间的相位关系发生变化，破坏了驱动力矩、电压抑制力矩、补偿力矩等相互间原有的比例关系，使电能表产生了电压附加误差，简称电压误差。②频率影响。电网频率与电能表的额定频率不同时，将引起电流、电压工作磁通幅值以及它们之间的相位差的变化，致使电能表产生频率附加误差，简称频率误差。③温度影响。环境温度改变后，制动磁通会发生变化，电流、电压工作磁通大小及相角都要改变，引起温度附加误差，简称温度误差。④其他因素影响。自热，电压、电流波形畸变，位置倾斜，不稳定运行，三相电压不对称，相序，负载功率因数等都会引起附加误差，影响电能表的准确性。

(2) 电子式电能表附加误差。主要因素有：①波形畸变。电网波形发生畸变即含有不同频率的高次谐波时，造成电能表采样无法同步，使计量失准产生误差。②冲击负荷。冲击负荷起停快、持续时间短、随机性强，导致电能表无法正确采样，产生误差。③外界电磁干扰。电子式电能表较易受到静电、群脉冲、浪涌等外界电磁干扰的影响，引起部分电子元器件失效，产生误差。④其他因素影响。自热、电压骤变、三相电压不对称、相序、负载功率因数等都会引起附加误差，影响电能表的准确性。

dianneng jiliang fangshi

电能计量方式　(electricity metering means)　计量电能的方法与形式。不同的计量电能对象、与计量对象相对应的供电方式和电费计费方式等都是确定电能计量方式的主要因素。

电能计量方式一般分为高供高计、低供低计和高供低计3种。①高供高计。在高压侧进行电能计量的方式，适用于供电电压等级在10kV及以上的高压供电用户，在高压侧须配备高压电压互感器（TV）和高压电流互感器（TA）。②低供低计。在低压侧进行电能计量的方式，适用于供电电压等级为0.4kV及以下的低压供电用户，在低压侧安装直接式电能表或互感器接入式电能表。③高供低计。当高压侧不具备装设电能计量装置的条件时，采用在低压侧经低压电流互感器（TA）进行电能计量的方式，适用于供电电压等级在10kV及以上的高压供电用户及有专用配电变压器的用户。

dianneng jiliang guanli

电能计量管理　(management of electricity metering)　以保证电能计量的准确和可靠为目标的活动。电能在其生产、传输、分配以及转换为各种有用能的产品消费过程中，都要经过能量平衡计量及交易结算。因此，电能计量管理的目的，是保证电能计量单位统一、电能量值准确可靠、电能计量装置安全运行，以及电能交易的公平公正。

世界各国电能计量管理的内容与方式基本相似，主要都是围绕电能计量装置进行。电能计量管理的结果将直接影响供用电双方的经济利益。因此，世界各国都把贸易结算用电能表作为国家强制监督的计量器具，并通过立法或授权确定设置国家电能最高标准和量值溯源体系。在中国，电能计量必须使用专用的电能计量装置，电能计量器具的配置、检定与校准必须接受国家计量行政管理部门的依法监督。供电企业的电能计量标准必须溯源至国家最高标准，并按照国家计量行政管理部门的授权开展电能量值传递、对贸易结算用电能计量器具进行强制检定等技术及管理工作。图示为电能表自动化检定设备。

中国的电能计量管理主要包括计量体系管理、计量点管理、计量资产管理、计量装置管理等。

计量体系管理　为保证电能计量实施过程准确可靠的管控活动。中国的计量体系是根据JJF 1069—2012《法定计量检定机构考核规范》和JJF 1033—2008《计量标准考核规范》建立和持续运行的管理体系。通过对计量人员、计量设施、量值溯源与传递、计量考核以及技术文档的规范管理，确保计量体系实施过程中的应用，提供准确可靠的计量检定、校准和检测结果。计量体系管理包括量值传递、计量文档管理、计量人员管理、计量考核管理、计量标准及测试设备管理等。



电能表自动化检定设备

计量点管理　确保电能计量装置接入电网中的位置能够满足准确可靠、安全运行和电量结算的管控活动。电能计量点设置的基本原则：①贸易结算用电能计量装置，其计量点

原则上设置在供用电设施的产权分界处（见产权分界点）；如果产权分界处不具备装设电能计量装置的条件或为了便于结算和管理，经供用电双方商定可将电能计量点设置在其他合适位置，其线路损耗由产权所有者承担。②用于供电企业经济技术指标考核的电能计量装置，计量点应设置在职责分界处或根据考核对象选取便于管理的合适位置。③高压供电且在受电变压器低压侧计量的，应加计变压器损耗。计量点管理包括计量点设计、计量方式确定、计量装置的选用、订货验收、安装竣工验收、运行维护、现场检验、周期检定（轮换）、故障处理、拆除报废等。

计量资产管理　使计量资产在设备寿命周期内实现资产效益最大化的管控活动。计量资产包括电能计量器具（电能表、互感器）、电能计量柜（箱）、失压计时仪、用电采集设备、计量标准及其检定装置等。计量资产管理涉及设备选购、验收、库存、配送、丢失、停用与报废的全过程，从信息流和实物流两个方面进行管控，实现电能计量设备的全生命周期管理。

计量装置管理　为了保证电能量值准确可靠和电能计量装置安全运行的管控活动。电能计量装置包括各种类型的电能表、测量用（电力）电压互感器和电流互感器及其二次回路、电能计量柜（箱）等。由于计量对象的量级相差悬殊，其计量允许误差引起的绝对值大小不同，因而按计量对象的量级对电能计量装置进行技术分类管理。（见电能计量装置）

见营业管理。

dianneng jiliang zhuangzhi

电能计量装置　（electricity metering devices）　用于测量、记录发电量、供（互供）电量、厂用电量、线损电量和用户用电量的计量器具。电能计量装置包括各种类型电能表，测量用（电力）电压、电流互感器及其二次回路，电能计量柜（箱）等。

分类　电能计量装置一般按其所计量电能量的多少和计量对象的重要程度且便于管理进行分类。DL/T 448—2000《电能计量装置技术管理规程》，将电能计量装置分为5类（Ⅰ～Ⅴ）进行管理，见表。计量电能量多或属贸易结算重要的计量点，则按高级类别的电能计量装置实施管理，并配置准确度等级高的电能计量器具。

电能计量装置分类及应配置的电能表与互感器的准确度等级

电能计量装置类别	准确度等级			
	有功电能表	无功电能表	电压互感器	电流互感器
Ⅰ	0.2S或0.5S	2.0	0.2	0.2S或0.2*
Ⅱ	0.5S或0.5	2.0	0.2	0.2S或0.2*
Ⅲ	1.0	2.0	0.5	0.5S
Ⅳ	2.0	3.0	0.5	0.5S
Ⅴ	2.0			0.5S

* 0.2级电流互感器仅在发电机出口电能计量装置中配用。

适用范围　各类电能计量装置的适用范围：①Ⅰ类：月平均用电量500万kW·h及以上或变压器容量为10000kV·A及以上的高压计费用户、200MW及以上发电机、发电企业上网电量、电网经营企业之间的电量交换点、省级电网经营企业与其供电企业的供电关口计量点的电能计量装置。②Ⅱ类：月平均用电量100万kW·h及以上或变压器容量为2000kV·A及以上的高压计费用户、100MW及以上发电机、供电企业之间的电量交换点的电能计量装置。③Ⅲ类：月平均用电量10万kW·h及以上或变压器容量为315kV·A及以上的计费用户、100MW以下发电机、发电企业厂（站）用电量、供电企业内部用于承包考核的计量点、考核有功电量平衡的110kV及以上的送电线路电能计量装置。④Ⅳ类：负荷容量为315kV·A以下的计费用户、发供电企业内部经济技术指标分析、考核用的电能计量装置。⑤Ⅴ类：单相供电的电力用户计费用电能计量装置。

配置原则　电能计量装置的配置首先应正确地确定电能计量装置的类别以及所配置的电能表和测量用（电力）互感器的准确度等级；其次，选择相应准确度等级的性能和质量优良的电能表、测量用（电力）互感器及其二次回路导线，并按规定检定、安装和维护，以保障电能计量装置运行的安全、准确、可靠。

贸易结算用电能计量装置原则上应设置在供用电设施的产权分界处；在发电企业上网线路、电网经营企业间的联络线路和专线供电线路的另一端应设置考核用电能计量装置。

计量单机容量在100MW及以上发电机组上网贸易结算电量的电能计量装置和电网经营企业之间购销电量的电能计量装置，宜配置准确度等级相同的主副两套有功电能表。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类贸易结算用电能计量装置应按计量点配置计量专用电压、电流互感器或者专用二次绕组。

电流互感器额定一次电流的确定，应保证其在正常运行中的实际负荷电流达到额定值的60%左右，至少应不小于30%。否则应选用高动热稳定电流互感器以减小变比。互感器实际二次负荷应在25%～100%额定二次负荷范围内；电流互感器额定二次负荷的功率因数应为0.8～1.0；电压互感器额定二次功率因数应与实际二次负荷的功率因数接近。

互感器二次回路的连接导线应用铜质单芯绝缘线。对电流二次回路，连接导线截面积应按电流互感器的额定二次负荷计算确定，应不小于$4mm^2$。对电压二次回路，连接导线截面积应按允许的电压降计算确定，应不小于$2.5mm^2$。

35kV以上贸易结算用电能计量装置中电压互感器二次回路，应不装设隔离开关辅助触点，但可装设熔断器；35kV及以下贸易结算用电能计量装置中电压互感器二次回路，应不装设隔离开关辅助触点和熔断器。

经电流互感器接入的电能表，其标定电流宜不超过电流互感器额定二次电流的30%，其额定最大电流应为电流互感器额定二次电流的120%左右。直接接入式电能表的标定电流应按正常运行负荷电流的30%左右进行选择。

为提高低负荷计量的准确性，应选用过载 4 倍及以上的电能表；带有数据通信接口的电能表，其通信规约应符合 DL/T 645—2007《多功能电能表通信协议》的要求。

具有正、反向送电的计量点应装设计量正向和反向有功电量以及四象限无功电量的电能表。

执行功率因数调整电费的用户，应安装能计量有功电量、感性和容性无功电量的电能计量装置；按最大需量计收基本电费的用户应装设具有最大需量计量功能的电能表；实行分时电价的用户应装设复费率电能表或多功能电能表。

dianneng jiliang zhuangzhi jiexian

电能计量装置接线 (connection of electricity metering devices) 电能计量装置与被测电路的电气连接。主要包括电能表、电压互感器和电流互感器及其与被测电路的电气连接。一般按被测电路的中性点接地方式、电压等级和负载电流大小等分类。电能计量装置接线应符合国家或行业标准（规程）的规定，否则，即使电能表、互感器均符合准确度等级要求，接线运行的测量结果也不一定正确。

中国电能计量装置接线规则及接线方式执行 DL/T 448—2000《电能计量装置技术管理规程》和 DL/T 825—2002《电能计量装置安装接线规则》。

接线规则 电能计量装置的接线规则：①接入中性点绝缘系统的电能计量装置，应采用具备有功和无功计量功能的三相三线电能表。接入非中性点绝缘系统的电能计量装置，应采用具备有功和无功计量功能的三相四线电能表。②接入中性点绝缘系统的 3 台电压互感器，35kV 及以上的宜采用 Yy 方式接线；35kV 以下的宜采用 VV 方式接线。接入非中性点绝缘系统的 3 台电压互感器，宜采用 YNyn 方式接线。其一次侧接地方式与系统接地方式一致。③低压供电，负荷电流为 50A 及以下时，宜采用直接接入式电能表；负荷电流为 50A 以上时，宜采用经电流互感器接入电能表。④对三相三线制接线的电能计量装置，其 2 台电流互感器的二次绕组与电能表之间宜采用四线连接。对三相四线制连接的电能计量装置，其 3 台电流互感器二次绕组与电能表之间宜采用六线连接。⑤所有计费用电流互感器的二次接线应采用分相接线方式，非计费用电流互感器可以采用星形（或不完全星形）接线方式。⑥互感器二次回路中设置联合（试验）接线盒，以便在现场运行、不停电状态下检验电能表和带电状态下安全拆、装电能表。

接线方式 电能计量装置的接线方式：①按被测电路的不同分为单相、三相三线、三相四线 3 种；②按电压和电流的高低或大小分为直接接入电能表和经互感器分相接入电能表两种。在中国，采用不同类型的电能表、电流互感器和电压互感器构成了各电压等级的不同电能计量方式，与之相对应的电能计量装置接线共有 143 种。常用的典型接线方式有单相电路有功电能测量接线、三相四线电路有功电能测量接线、三相三线电路有功电能测量接线、三相有功和无功电能的联合测量接线。

单相电路有功电能测量接线 用于低压供电的单相二线方式，安装单相有功电能表。电能表直接接入被测电路的测量接线见图 1（a），电能表经电流互感器接入被测电路的测量接线见图 1（b）。

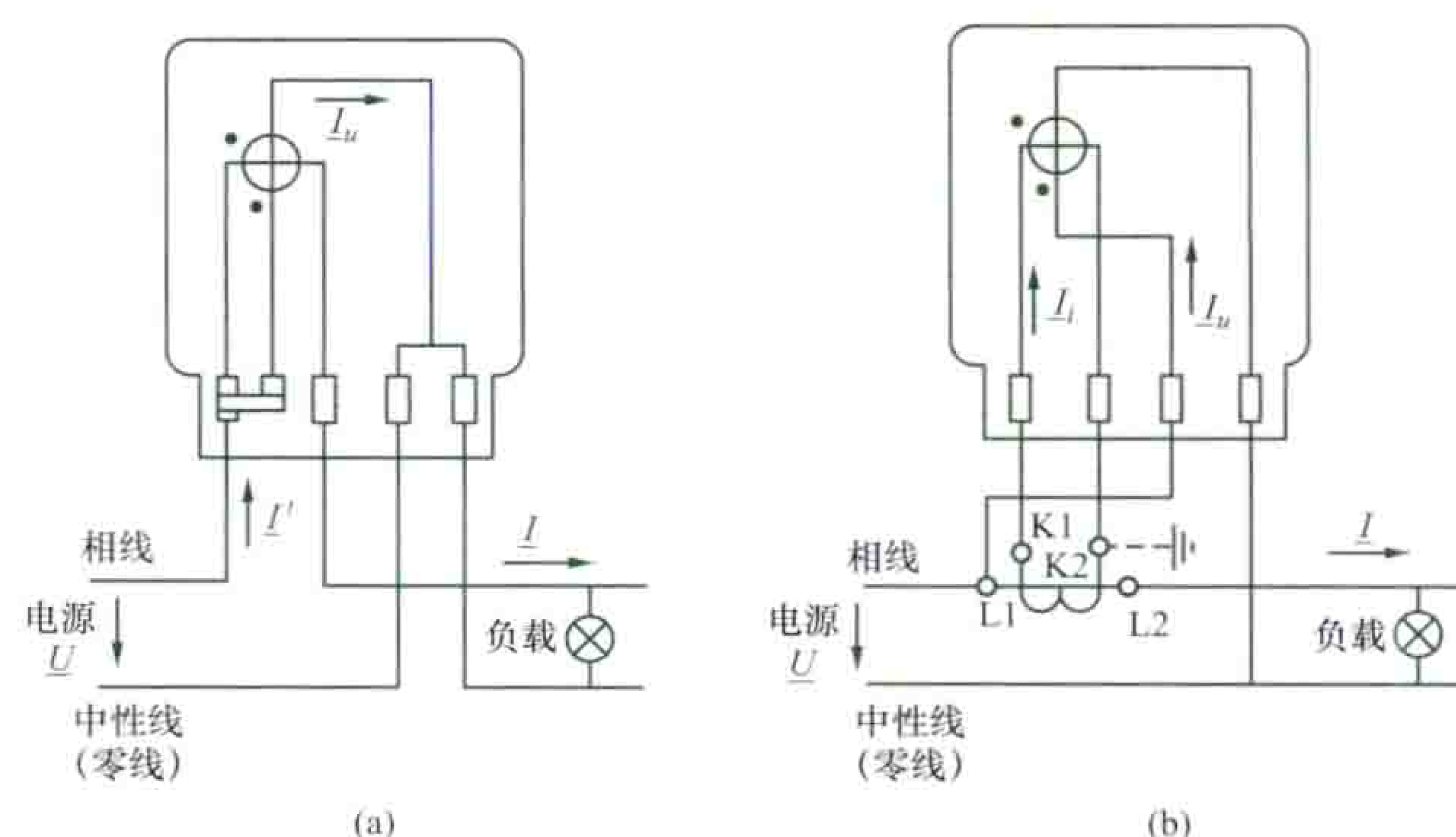


图 1 单相有功电能表测量单相电路有功电能的接线
（a）直接接入；（b）经电流互感器接入

三相四线电路有功电能测量接线 用于三相四线供电方式，安装三相四线有功电能表。测量低压三相四线电路有功电能时，安装三元件三相四线有功电能表，电能表直接接入被测电路的测量接线见图 2（a），电能表经电流互感器接入被测电路的测量接线见图 2（b）。

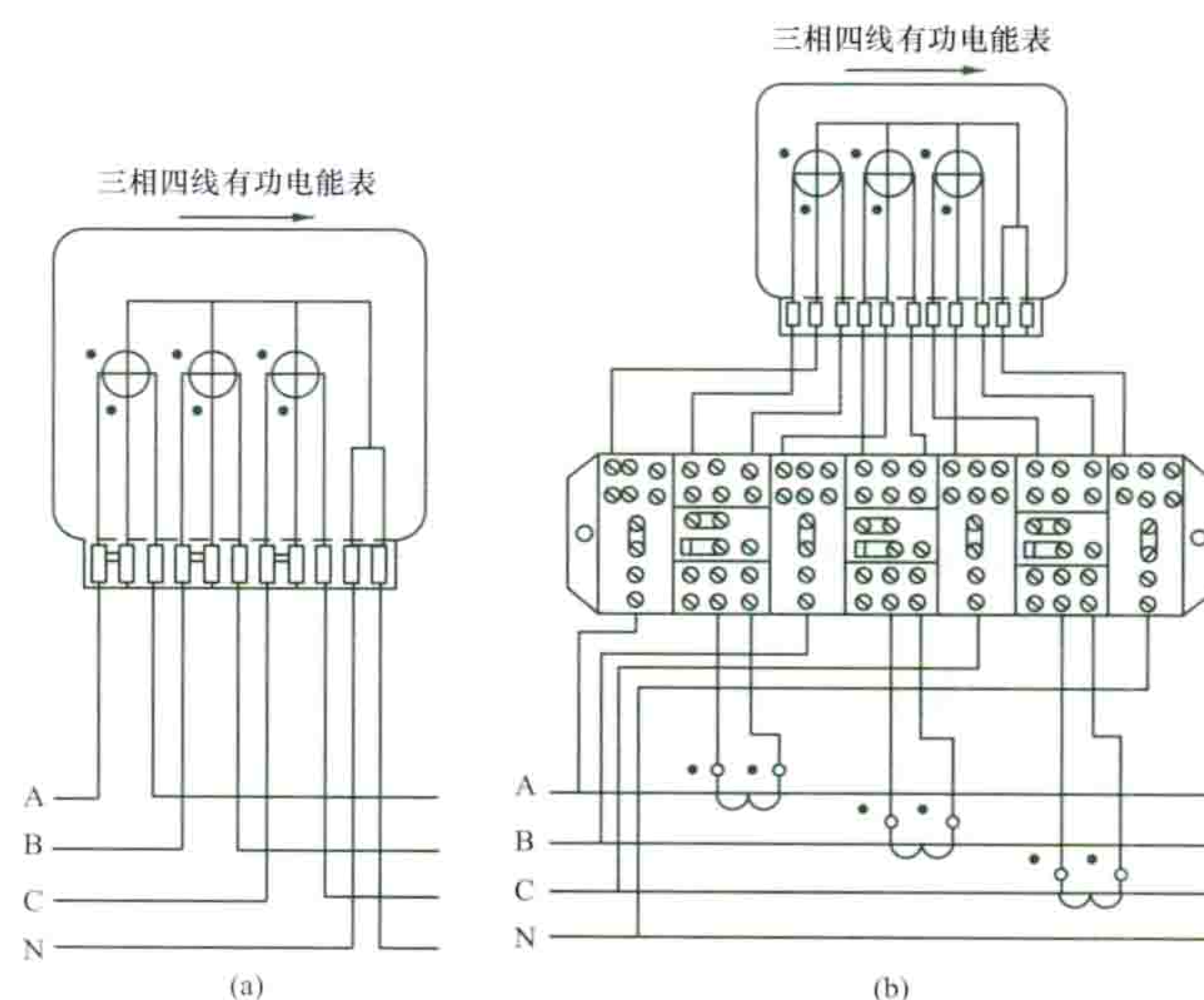


图 2 三相四线有功电能表测量三相四线电路有功电能的接线
（a）直接接入；（b）经电流互感器接入

三相三线电路有功电能测量接线 用于三相三线供电方式，安装三相三线有功电能表。测量低压三相三线电路有功电能时，安装一只二元件三相三线有功电能表，电能表直接接入被测电路的测量接线见图 3（a），电能表经电流互感器接入被测电路的测量接线见图 3（b），电能表经电压互感器、电流互感器接入被测电路的测量接线见图 3（c）和图 3（d）。

图 3（a）中，第一元件电流接 $\dot{I}_A$，电压接 $\dot{U}_{AB}$；第二元件电流接 $\dot{I}_C$，电压接 $\dot{U}_{CB}$。三相电路对称时，按图 3 接线，与两只单相电能表分相接入三相三线电路测得的功率是一致的，都是

$$P=U_{AB}I_A\cos(30^\circ+\varphi)+U_{CB}I_C\cos(30^\circ-\varphi)$$

三相有功和无功电能联合测量接线 用于三相供电方式，同时测量有功电能和无功电能，安装三相有功电能表和

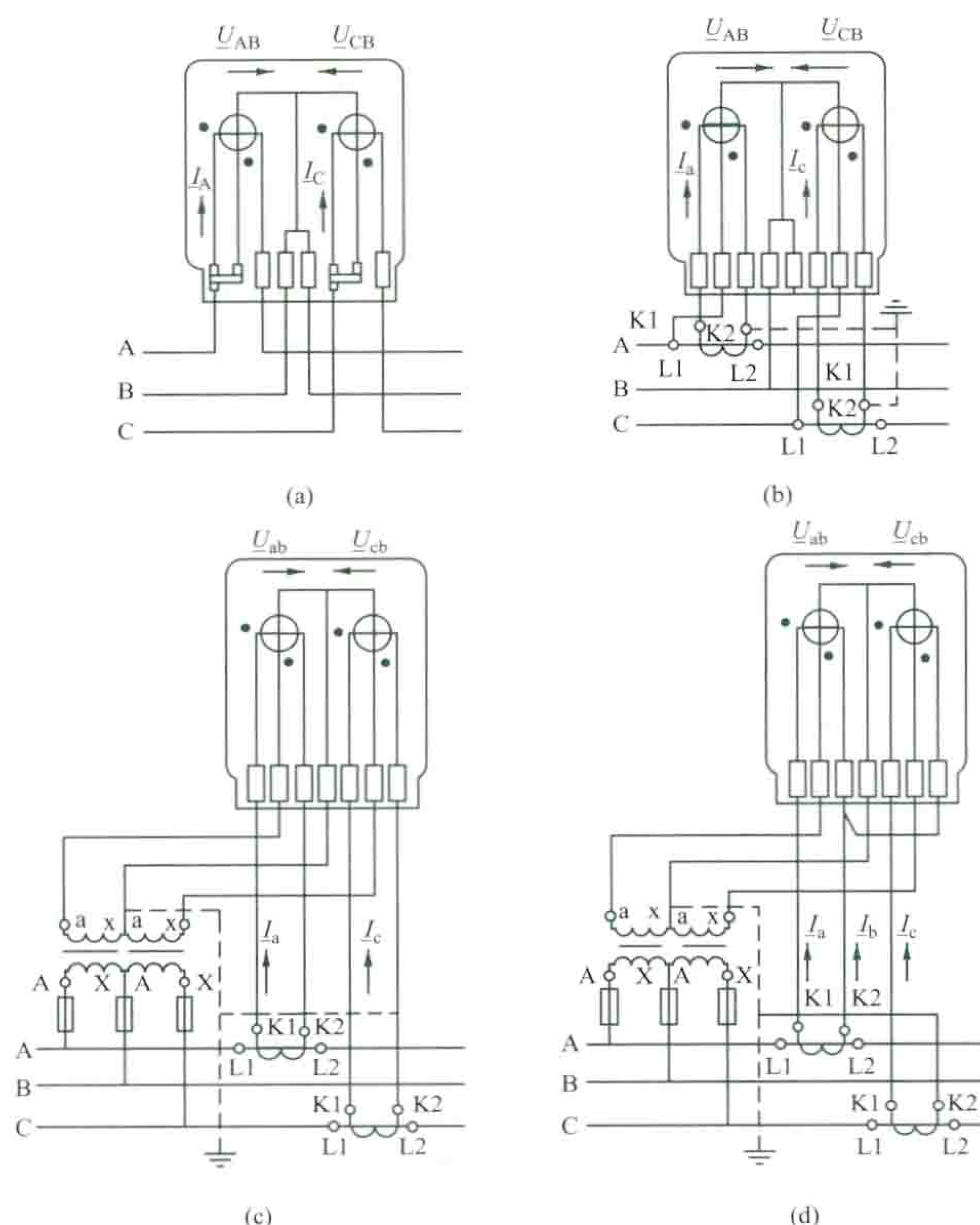


图 3　三相三线有功电能表测量三相三线电路有功电能的接线

（a）直接接入；（b）经电流互感器接入；（c）、（d）经电压互感器、电流互感器接入

三相无功电能表，并在互感器二次回路加装联合接线盒。测量低压三相四线电路有功电能和无功电能时，安装一只三元件三相四线有功电能表和一只三元件跨相连接的无功电能表（带止逆），电能表经电流互感器分相接入被测电路的测量接线见图 4。测量非中性点绝缘系统三相三线高压电路的有功

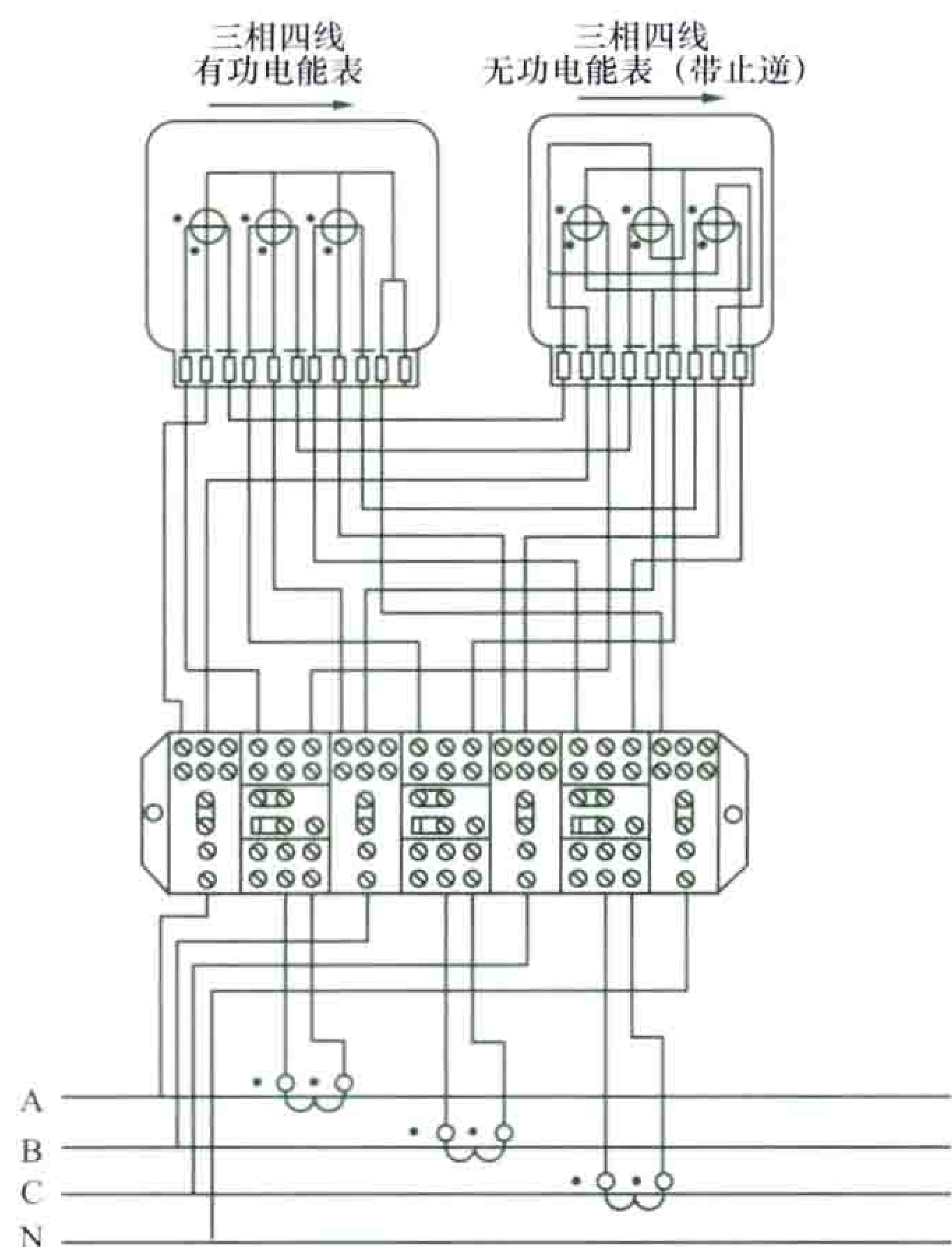


图 4　三相四线有功和无功电能表经电流互感器分相接入低压被测电路测量三相有功及无功电能的联合接线

和感性无功电能时，安装一只二元件三相三线有功电能表和一只二元件三相三线无功电能表（带止逆），电能表经电流互感器分相接入被测电路的测量接线见图 5。测量非中性点绝缘系统三相三线高压电路的有功和感性、容性无功电能时，安装一只二元件三相三线有功电能表和两只二元件三相三线无功电能表（均带止逆），电能表经电流互感器分相接入被测电路的测量接线见图 6。测量中性点绝缘系统三相四线高压电路有功和感性、容性无功电能时，安装一只三元件三相四线有功电能表和两只三元件三相四线无功电能表（均带止逆），电能表经电流互感器分相接入被测电路的测量接线见图 7。

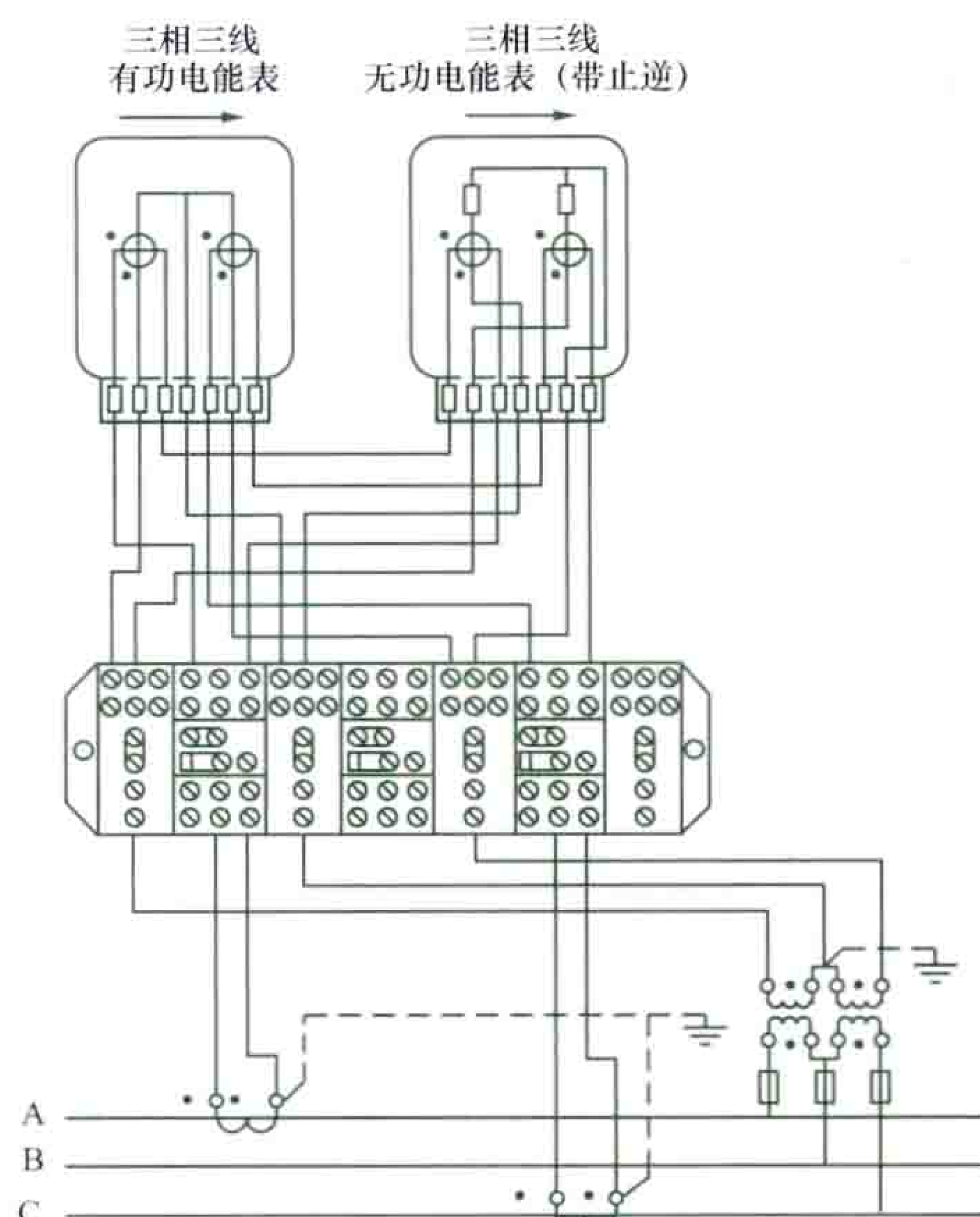


图 5　三相三线有功和无功电能表经电流互感器分相接入非中性点绝缘系统高压被测电路测量三相有功和感性无功电能的联合接线

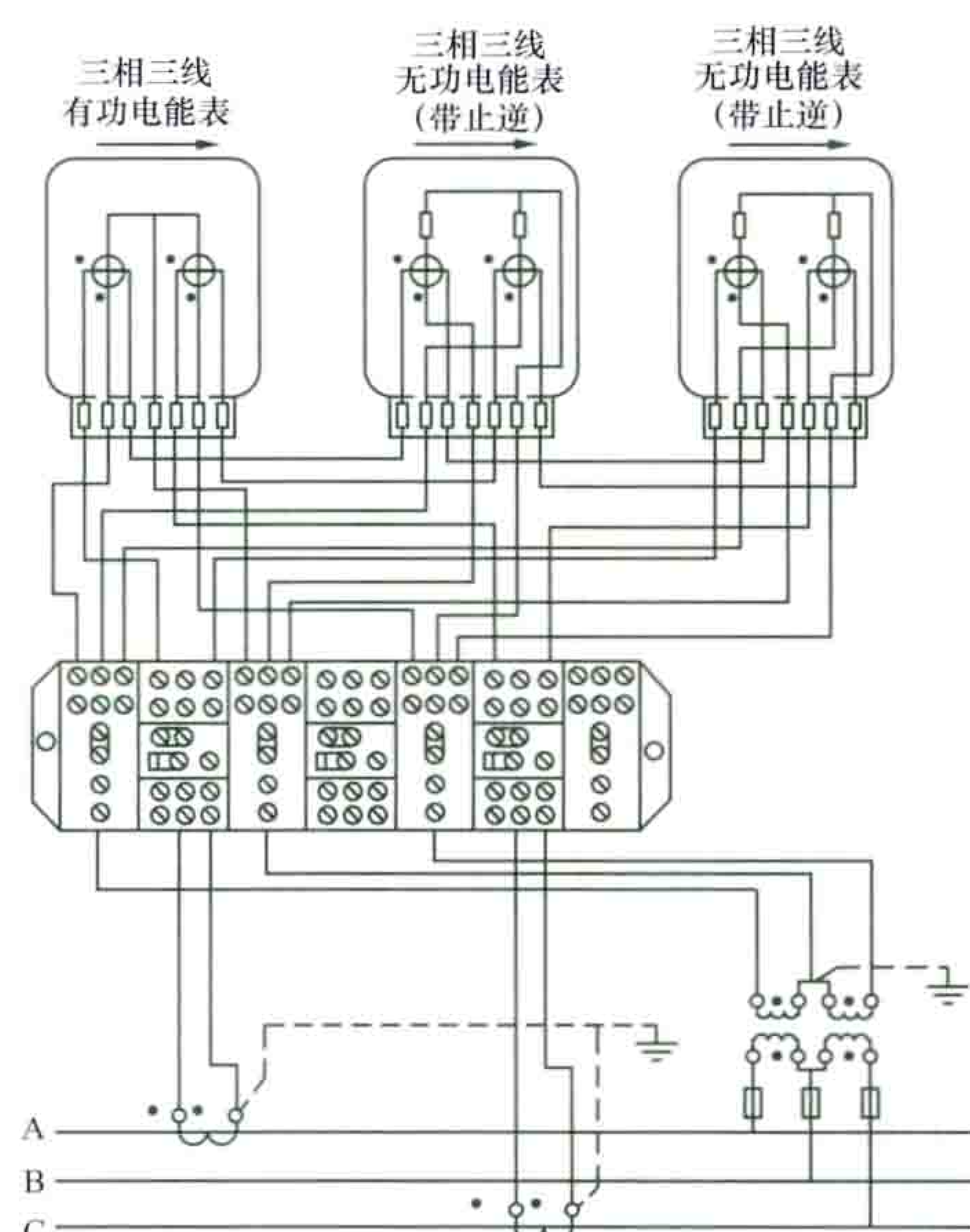


图 6　三相三线有功和无功电能表经电流互感器分相接入非中性点绝缘系统高压被测电路测量三相有功和感性、容性无功电能的联合接线

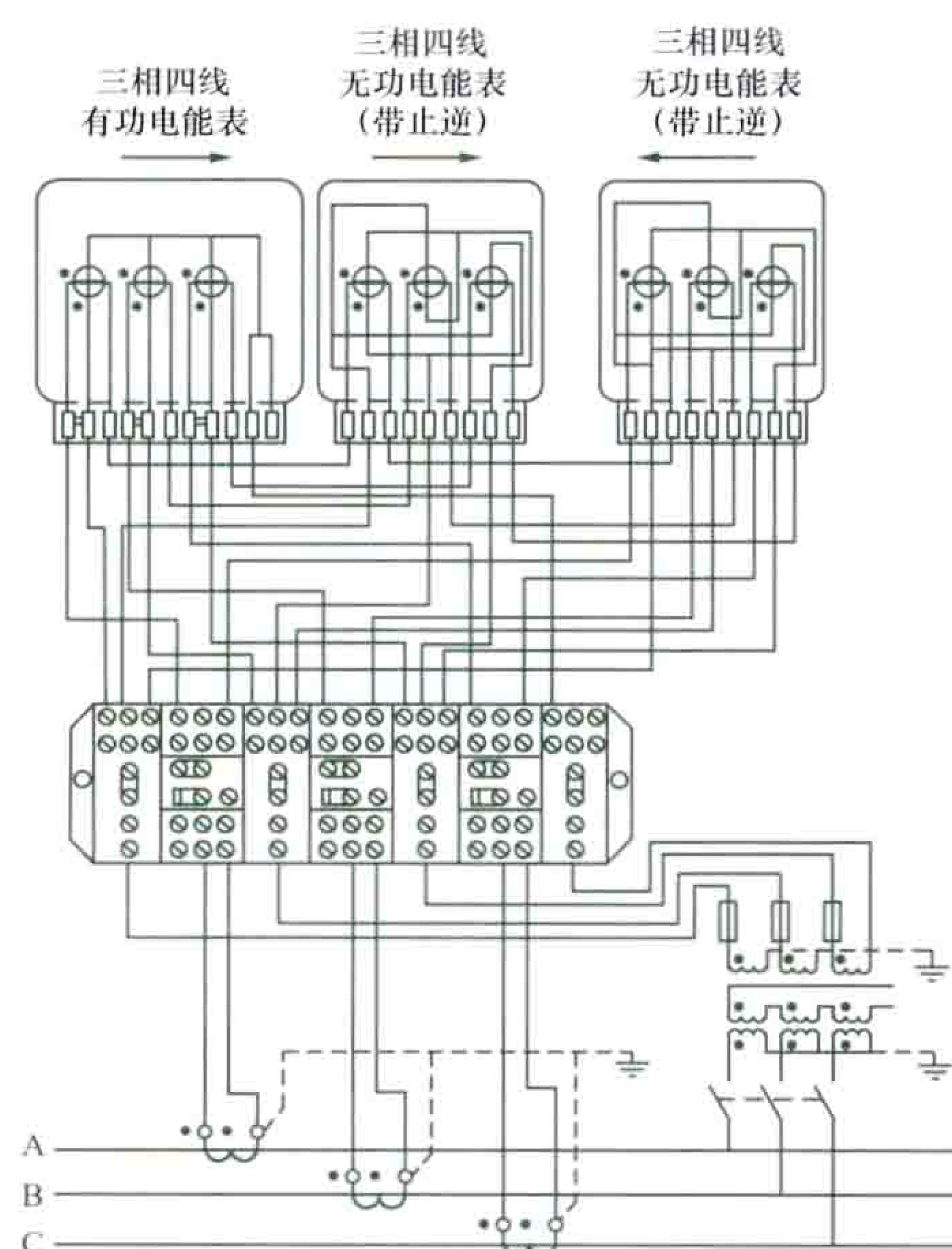


图7　三相四线有功和无功电能表经电流互感器分相接入中性点绝缘系统高压被测电路测量三相有功和感性、容性无功电能的联合接线

参考书目

国家电网公司运营部．电能计量装置接线图集．北京：中国电力出版社，2004.

dianneng liyonglü

电能利用率　(utilization rate of electrical energy)　用电体系（即用电对象或范围）内的有效电能量占供给电能量的百分数。电能利用率表示用电体系在一定的生产周期内，完成生产计划时，对供给电能的有效利用程度，是衡量用电体系合理用电程度的主要标志，是判断用电体系耗能水平与电能利用合理性、经济性的一项综合性指标，也是考察企业、车间电能利用状况的基本依据。电能利用率一般通过电能平衡测试取得。其表达式为

$$H=\frac{W_y}{W_g}\times100\%$$

或

$$H=\left(1-\frac{W_s}{W_g}\right)\times100\%$$

式中 H 为用电体系的电能利用率，%；W_g 为供给电能量，指从用电体系边界外供给用电体系的有功电能量，kW·h；W_y 为有效电能量，指用电体系在一定生产工艺条件下，达到预定生产目标及工艺规定的产品质量标准时，在物理、化学变化中必须消耗的有功电能量，kW·h；W_s 为损失电能量，其值为供给电能量与有效电能量之差，kW·h。

dianneng pingheng

电能平衡　(electrical energy balance)　对用电体系（即用电对象或范围）使用电能的情况进行定量分析的一种科学方法。电能平衡是对外界供给用电体系内电能量的输送、转换、分布、流向进行考核、测量、分析和研究，并建立供给电能量、有效电能量和损失电能量之间平衡关系的全过程。

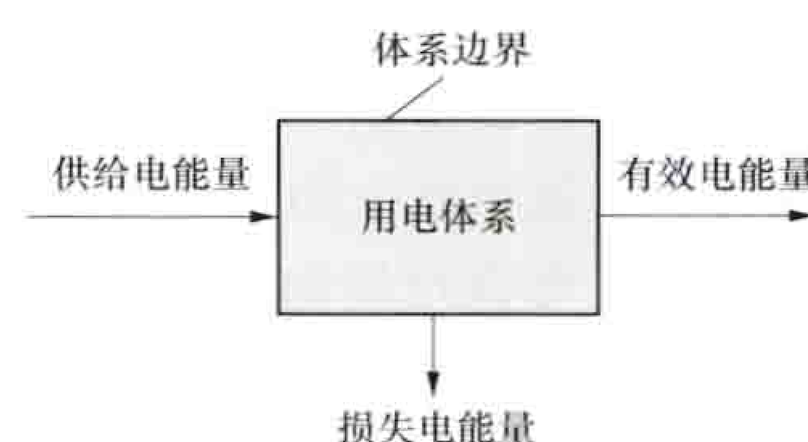
依据用电对象或范围不同，电能平衡一般分为设备电能平衡和企业电能平衡。设备电能平衡是对一台设备、一套装置的电能平衡；企业电能平衡是对一个车间、一个企业的电能平衡。设备电能平衡是企业电能平衡的基础，企业电能平衡水平取决于企业内众多设备的电能有效利用程度。

根据能量守恒定律，用电体系电能平衡的基本模型如图所示。

电能平衡式为

供给电能量＝有效电能量＋损失电能量

供给电能量是从用电体系边界外供给用电体系的电能量；有效电能量是用电体系在一定生产工艺条件下，达到预定生产目标及工艺规定的质量标准时，在物理、化学变化中必须消耗的电能量；损失电能量为供给电能量与有效电能量之差，是在输送、转换和产品生成过程中损失的电能量，其中一部分损失是不可避免的，另一部分损失通过采取措施是可以避免的。



电能平衡的基本模型

通过电能平衡可以全面、系统地掌握企业的用电状况，从电能的输入、分配、传递、转换和使用等方面，了解各个环节电能利用与损失的情况和规律，测算主要用电设备的实际运行效率和企业电能利用率，分析电能利用水平，找出设备、工艺、操作、管理等方面的节能潜力，制定综合技术改造措施和规划，为加强企业用电管理、制定单位产品（产值）耗电定额、合理用电、提高电能利用率提供科学依据。

dianpaoguang

电抛光　(electropolishing)　以金属工件为阳极，在适宜的电解液中进行电解，有选择地除去其粗糙面，提高表面光洁程度的技术，又称电解抛光。电抛光可增加不锈钢的耐腐蚀性，减小电气接触点的电阻，制备金相磨片，提高照明灯具的反光性能，提高各种量具的精度，美化金属日用品和工艺品等，适用于钢铁、铝、铜、镍及各种合金的抛光。

对钢铁、铝、铜等金属工件进行抛光时，以工件为阳极，以铅板为阴极，分别在以硫酸、磷酸、铬酸等配制的电解液中进行电解。电解过程中，在工件（阳极）的表面形成高电阻的黏稠液膜。从微观上看，工件表面凹进去的部分附着的液膜较厚，因而电流密度较小，工件金属溶解的速度较慢；凸出的部分附着的液膜较薄，因而电流密度较大，工件金属溶解的速度较快，使凸出部分首先溶解掉，从而提高了工件表面的光洁程度和光泽。电抛光的特点是阳极电流密度大，且因金属不同电流密度变化范围很大，可达60～10000A/m^2；加工效率高，工序少，可在数秒至数分钟内完成抛光过程。

电抛光的过程主要是阳极溶解过程，其阳极反应为：

（1）阳极（工件）毛刺和凸起部分的金属失去电子溶入电解液



$$M-2e\longrightarrow M^{2+}$$

（2）生成氧化膜



$$M+H_2O-2e\longrightarrow MO+2H^+$$

（3）析出气体氧



$$2H_2O-4e\longrightarrow O_2+4H^+$$

电抛光阴极的主要作用是导电，氢离子在阴极上放电，析出氢气。

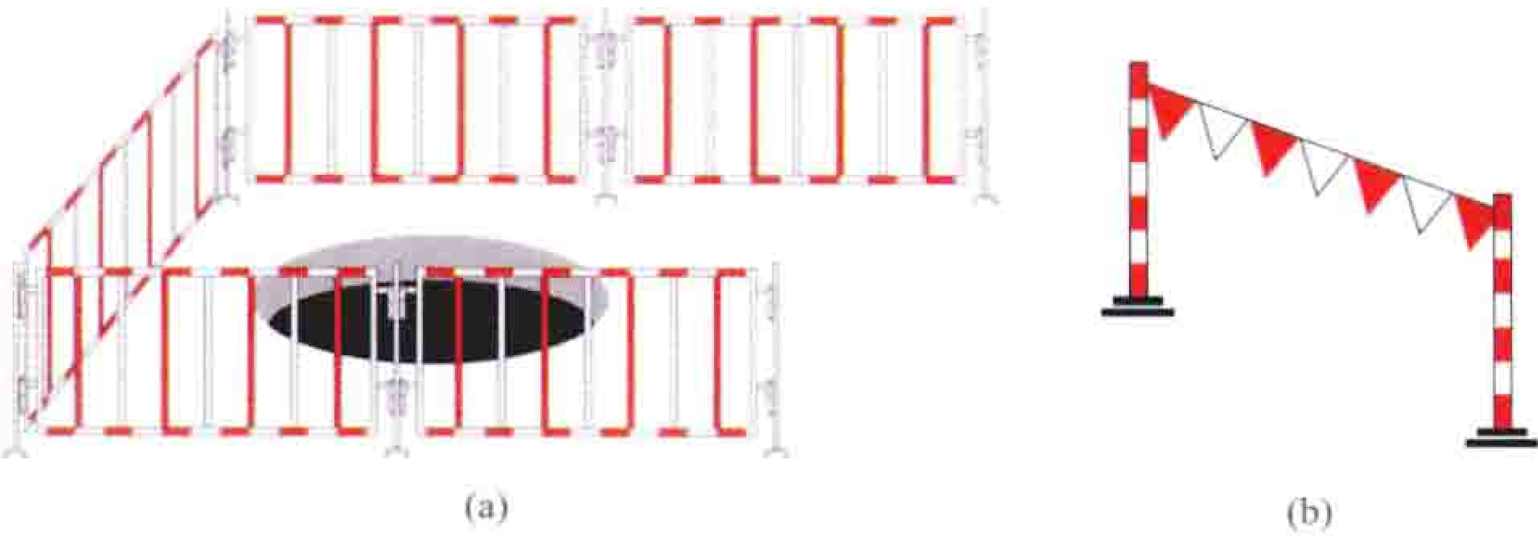
dianqi anquan yongju

电气安全用具 (safety appliance) 防止电气工作人员进行电气操作或检修时发生触电、电弧灼伤、高空坠落等事故而使用的工具。电气安全用具不仅有助于完成工作任务，而且对保护人身安全起着重要作用。为保证工具的使用安全，对各种电气安全用具应注意维护、保养和进行电气试验。

分类 电气安全用具分绝缘安全用具和一般防护安全用具两大类。

绝缘安全用具 有一定绝缘强度，用以保证电气工作人员与带电体绝缘的工具。它又分为基本安全用具和辅助安全用具。①基本安全用具。其绝缘强度能长期承受电气设备工作电压，可直接接触带电体。这类工具有绝缘棒、绝缘夹钳、绝缘绳、验电器等。②辅助安全用具。其绝缘强度不能承受工作电压，只能用来加强基本安全用具的防护作用，不能直接接触带电体。这类工具有绝缘手套、橡胶绝缘靴、绝缘垫、绝缘站台、绝缘毯等。

一般防护安全用具 本身没有绝缘强度，只用于防护工作人员避免发生人身事故的工具。一般防护安全用具主要用来防止停电检修设备的突然来电、工作人员走错间隔、误登带电设备以及电弧灼伤、高空坠落等。属于一般防护安全用具的工具有携带型接地线、临时遮栏（见图1）、标示牌、警告牌、防护目镜、安全帽、安全带（见图2）以及带电用的等电位屏蔽分流均压服等。登高用的梯子、脚扣、升降板和一些起重工具也属于一般防护安全用具。



(a) (b)

图1 临时遮栏

(a) 临时防护遮栏；(b) 临时提示遮栏

使用与维护 电气安全用具必须加强日常的保养和维护，防止受潮、损坏和脏污，使用前应进行外观检查，表面应无裂纹、划痕、毛刺、孔洞、断裂等外伤。电气安全用具不许当做其他用具使用。

各种安全用具应定期进行检查和试验。中国规定的试验周期和标准见表1和表2。



图2 安全带

表1 常用电气安全用具试验一览表

名称	电压等级(kV)	周期	交流耐压(kV)	时间(min)	泄漏电流(mA)	备注
绝缘棒	6～10	每年一次	44	5		
	35～154		4倍相电压			
绝缘挡板	6～10	每年一次	30	5		
	35(20～44)		80	5		
绝缘罩	35(20～44)	每年一次	80	5		
绝缘夹钳	≤35	每年一次	3倍相电压	5		
	110		260			
验电笔	6～10	每6个月一次	40	5		发光电压不高于额定电压的25%
	20～35		105			
绝缘手套	高压	每6个月一次	8	1	≤9	
	低压		2.5		≤2.5	
橡胶绝缘靴	高压	每6个月一次	15	1	≤7.5	
核相器电阻管	6	每6个月一次	6	1	1.7～2.4	
	10		10		1.4～1.7	
绝缘绳	高压	每6个月一次	105/0.5m	5		

表2 登高、起重工具试验标准表

分类	名称	试验静重(允许工作倍数)	试验周期	外表检查(周期)	试荷时间(min)	试验静拉力(N)
登高工具	安全带 大带		半年一次	每月一次	5	2205
	安全带 小带					1470
	安全腰绳		半年一次	每月一次	5	2205
	升降板		半年一次	每月一次	5	2205
	脚扣		半年一次	每月一次	5	980
	梯子		半年一次	每月一次	5	试验荷载1765N
起重工具	白棕绳	2	每年一次	每月一次	10	
	钢丝绳	2	每年一次	每月一次	10	
	铁链	2	每年一次	每月一次	10	
	葫芦及滑车	1.25	每年一次	每月一次	10	
	扒杆	2	每年一次	每月一次	10	
	夹头及卡	2	每年一次	每月一次	10	
	吊钩	1.25	每年一次	每月一次	10	
	绞磨	1.25	每年一次	每月一次	10	

dianqihua tielu

电气化铁路 (electric railway) 地区与地区间或城市与城市间采用电力牵引的铁路，又称电气化铁道。同样以轨道为导向、以电力为牵引能源的城市轨道交通或工矿企

业内部运输线路则不属电气化铁路范畴。电气化铁路（见图1和图2）具有运输能力大、速度高、运营费用低、能合理利用能源、有利于环境保护和改善机车乘务人员劳动条件等优点，是世界各国铁路牵引动力的主要发展方向。



图1　中国的电气化铁路（严浩　摄）



图2　澳大利亚的电气化铁路

简史　世界上第一条实用化电气化铁路是在1879年柏林工业博览会上展出的，由电力机车牵引三辆客车，采用第三轨供电，供电电压为直流150V。1881年在法国巴黎国际电工展览会上展出了第一条由架空接触线供电的直流电气化铁路。1895年日本京都市也正式开通了客运电气化铁路。日本的电气化铁路见图3。最初开通的电气化铁路都集中在都市内部，后来逐渐向郊区延伸。20世纪初开始应用于干线铁路。



图3　日本的电气化铁路（行驶在日本滨名湖附近的500系“希望”号高速列车创造了300km/h的最高运行速度）

中国电气化铁路起步较晚，发展很快。自1961年开通第一条电气化铁路——宝成铁路宝鸡—凤州段（线路全长91km）以来，经过50年的建设，截至2012年底，已建成的电气化铁路营业里程达4.8万km，居世界第一位。

分类　按接触网（见电气化铁路接触网）供电电流、电压制式，电气化铁路可分为直流制和交流制两大类。直流制电气化铁路是指由公共电力系统引入高压三相电源后，经铁路部门自建的电力牵引变电所降压、整流至直流1500V或3000V，再送到接触网，直接供电力机车牵引电动机使用的一种制式；而交流制电气化铁路加到接触网上的电压为工频单相25kV，整流的步骤则移到了电力机车上。早期欧洲少数国家曾采用过单相或三相低频制（$16\frac{2}{3}$Hz或25Hz），随着电力技术的进步，低频制已逐渐淘汰，交流制仅剩单相工频25kV一种制式。

接触网采用交流制还是直流制供电，对电气化铁路技术经济指标将产生重大影响。

两种制式电气化铁路的比较　包括：

（1）直流制接触网电压低是限制电气化铁路进一步提高运输能力和经济效益、降低运输成本的最大障碍。电力机车的牵引电动机通常均悬置于机车底部转向架车轴上，由于空间狭窄，牵引电动机的端电压不能太高。一般认为，从安全和经济角度出发，电动机电压不宜超过1500V。多数直流干线电气化铁路接触网电压为1500V或3000V。前者机车各轴上的牵引电动机均为并联运行；后者则需将两个轴的牵引电动机串联成一个分支，然后再将各分支并联接到接触网上。交流制的整流过程是在电力机车上实现的，因此机车交流侧的电压可以较大。世界各国的工频单相接触网电压大都定为25kV，中国也采用这一标准。采用这一电压等级的原因是出于综合技术经济分析的结果。电压高，接触网对铁路桥梁、隧道和其他建筑物的净空要求就大，土建工程费用将增加。另外，高压进入电力机车，在安全和绝缘方面的要求也较高。电压太低，接触网供电能力就小，供电设备数量和导线消耗将增加。在完成同一运输量的前提下，电气化铁路采用单相工频制需要的设备、器材仅为直流制时的30%，工程建设工期可大为缩短。

（2）交流牵引网的电压损失和电能损耗较直流制减少很多，这对电气化铁路的运营成本有很大影响。直流牵引网的损耗率一般为10%，而交流牵引网的损耗率仅为3%左右。以一条100km的双线电气化铁路为例，当限制坡度为12‰和上、下行货物运输量为5×10^7 t/a时，交流制可较直流制每年节约电力1.82×10^7 kW·h，经济效益十分显著。直流牵引网电压损失较大，使电气列车的运行速度受到较大影响，特别是在高速电气化区段，有可能打乱正常的运输秩序，造成重大经济损失。

（3）交流制电力机车各牵引电动机可实现全并联运行，机车黏着性能较好。而在直流3000V制式时，牵引电动机需要实行串并联方式，当串联分支内牵引电动机转矩不均衡时，有可能发展成为电力机车空转，使黏着性能变坏，牵引力下降。

（4）直流牵引网由钢轨泄入大地的迷散电流可对铁路沿线的地下金属管道、铠装电缆和其他地下金属构筑物造成严重电蚀。而交流牵引网的迷散电流对地下金属管道等的电解

作用很弱，电蚀现象轻微（见电力牵引迷散电流）。

（5）交流制对铁路沿线架空通信线的干扰影响较大（见交流牵引网对通信线路的影响），其单相整流负荷产生的负序电流、高次谐波及牵引负荷平均功率因数偏低等问题（见电力牵引高次谐波、电力牵引功率因数、交流电气化铁路的负序影响）对电力系统产生一定不利影响，有时需要采取特殊的补偿措施。尽管如此，单相工频 25kV 制仍以其优越的综合技术经济指标成为世界各国干线铁路电气化的首选方式。

dianqihua tielu jiechuwang

电气化铁路接触网

(overhead contact system of electric railway) 沿电气化铁路架设的向电力机车或电动车组供电的线路。由于电力机车是在运动状态中从接触网接受电能的，因此要求接触网必须安全可靠，具有良好的弹性，保证不间断供电和有较高的耐磨性、抗腐蚀性。一般电气化铁路的接触网（见图 1）为架空柔索式（也有采用刚性的），由接触悬挂和支持装置等组成。



图 1　北京电气化铁路接触网（严浩　摄）

接触悬挂　通常指接触线、承力索、吊弦等组成的馈电网络，见图 2。接触线经吊弦悬挂在承力索上，但简单接触悬挂不设承力索及吊弦，而将接触线直接固定在支持装置上或通过一根简单的吊索固定在支持装置上。

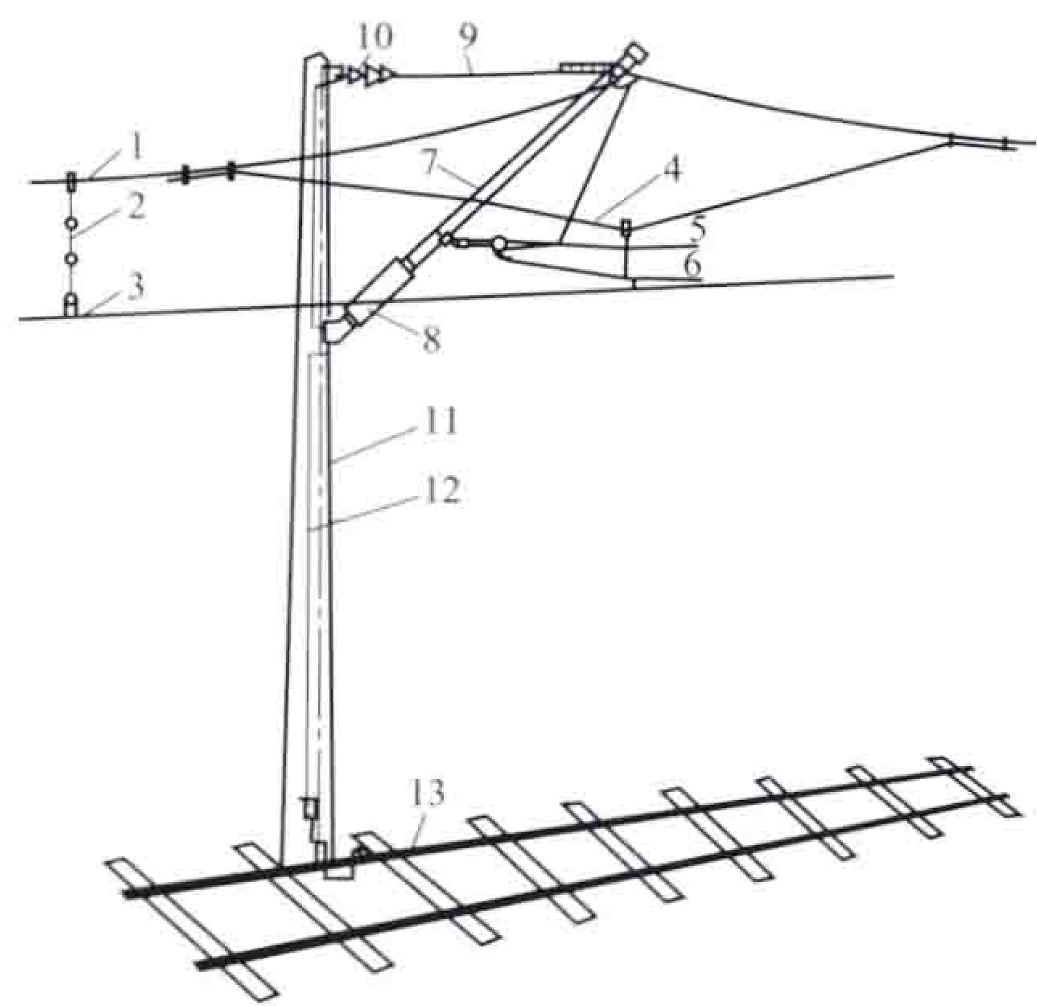


图 2　接触网组成示意图

1—承力索；2—吊弦；3—接触线；4—弹性吊弦；5—定位管；6—定位器；7—腕臂；8—棒式绝缘子；9—水平拉杆；10—悬式绝缘子串；11—支柱；12—接地线；13—钢轨

接触悬挂中直接与电力机车受电弓接触并向电力机车供电的导线，称为接触线，又称电车线。它为异形截面，如图 3 所示，由铜或铜合金、铝合金等材质冷拉成型。由于机车运行时接触线与受电弓直接接触，处于摩擦状态，为保证受流质量，接触线性能除必须满足导电要求外，还需具有足够的机械强度与耐磨性、耐腐蚀性。电气化铁路干线上多用 100mm² 以上当量铜截面的接触线，而支线、站场侧线、编组场线等多用截面积为 85mm² 的接触线，在高速、重载线路及牵引电流较大的干线上则采用大截面接触线。

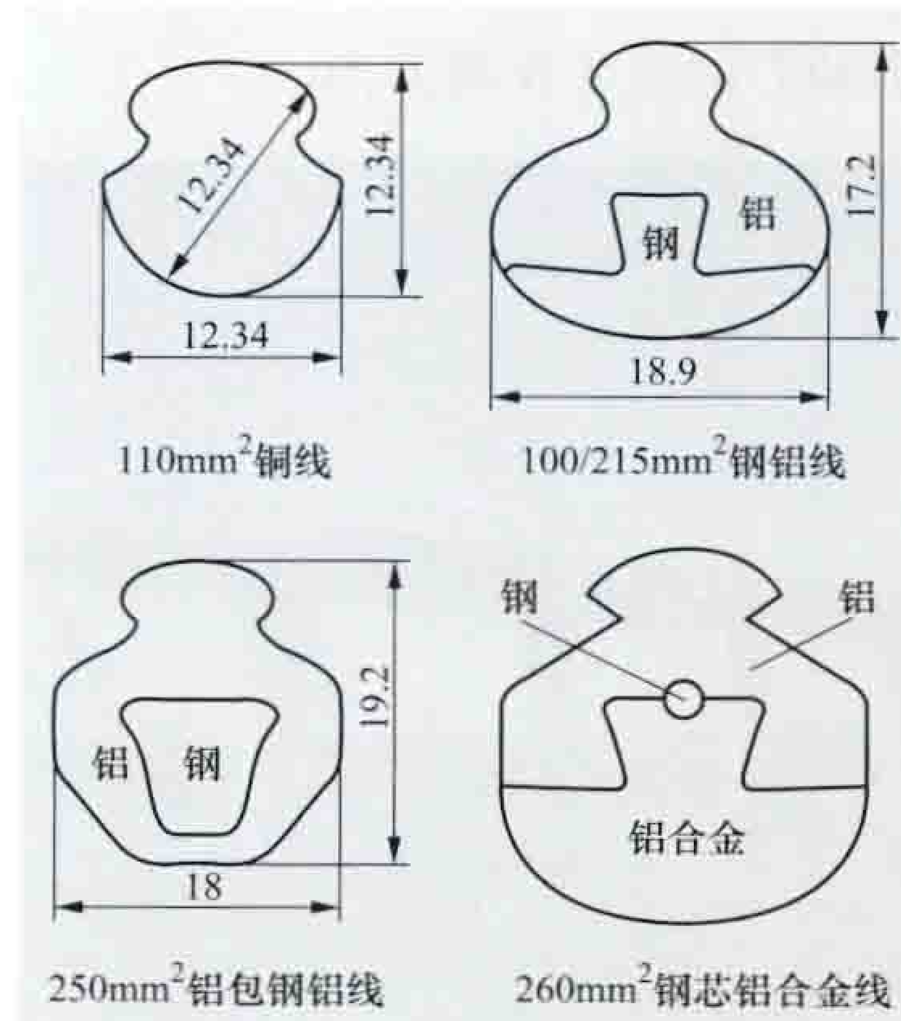


图 3　接触线截面形状

接触悬挂对电力机车的受流条件有直接影响。为适应行车要求，接触悬挂必须保证在恶劣的气候条件下，电力机车以线路允许的速度运行时，能不间断地、良好地受流。为此，接触悬挂应具备的性能包括：①应有足够的机械强度和良好的电气性能。各种线、索及其连接零部件等的机电性能均应保证在允许的条件下正常工作。②弹性均匀。在受电弓相同压力作用下，接触线各点的升高应尽量相等。③稳定性好。当电力机车通过时，接触线与受电弓滑板保持良好接触，不得超出受电弓允许的工作范围。④耐磨、耐电弧性能好。接触线与受电弓滑板间的相对磨耗应尽量小，一旦受电弓在允许范围内离线产生拉弧现象时，仍能维持正常运行。

接触悬挂按结构的不同分为简单悬挂、单链形悬挂（简称链形悬挂）、双链形悬挂和多链形悬挂。链形悬挂按支柱处采用吊弦的不同，分为简单链形悬挂、弹性链形悬挂和复链形悬挂，如图 4 所示。

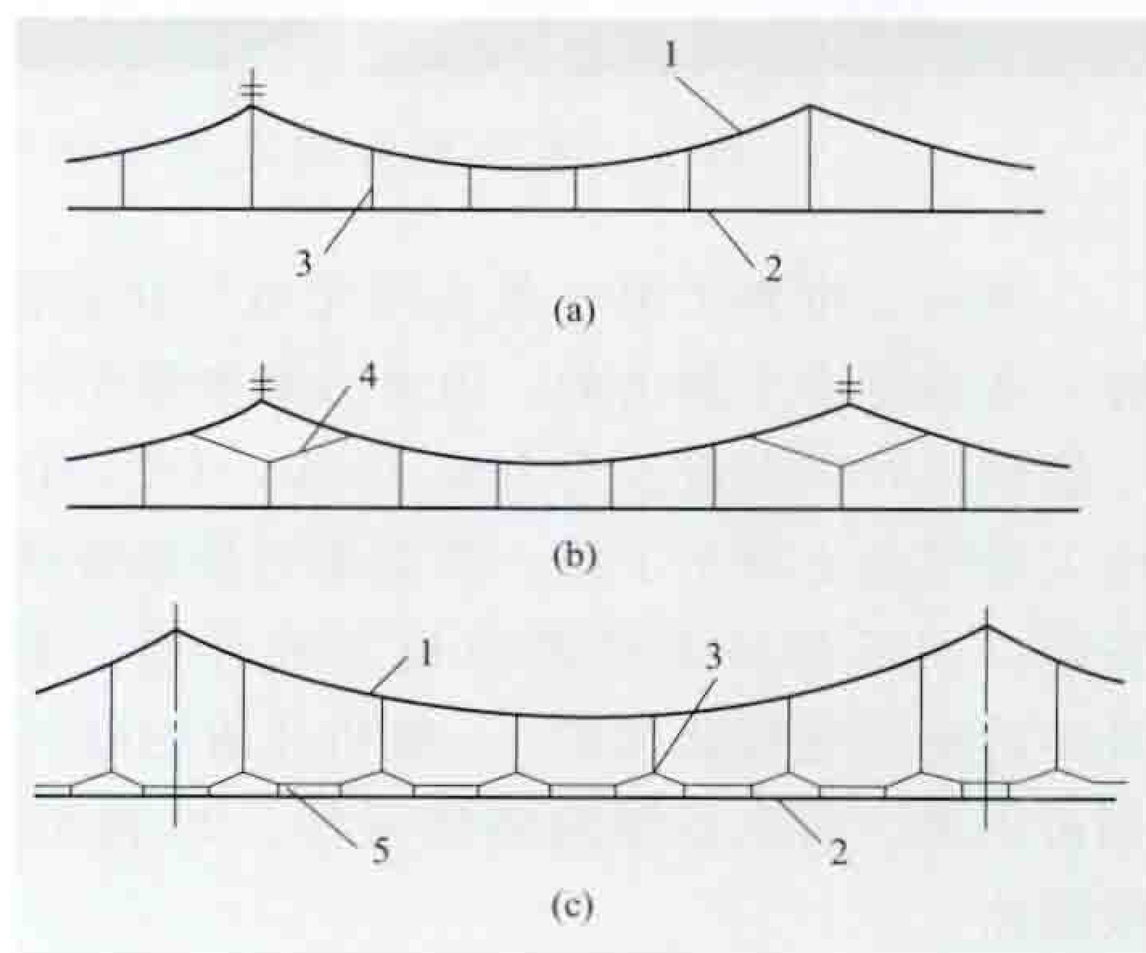


图 4　链形悬挂

(a) 简单链形悬挂；(b) 弹性链形悬挂；(c) 复链形悬挂

1—承力索；2—接触线；3—吊弦；4—弹性吊弦；5—辅助承力索

接触悬挂每隔 1500～2000m 需要进行分段。每一独立分段称为锚段。锚段两端的接触线及承力索分别在支柱上下锚。接触悬挂设置锚段后可以提高供电灵活性，缩小事故范围，还可在下锚处加张力自动补偿装置，保持导线张力不变，使接触线弛度恒定，提高受流质量。

相邻两个锚段互相衔接的部分称为锚段关节。当电力机车通过时，锚段关节应保证受电弓从一个锚段平滑地过渡到

另一个锚段。

支持装置　支持接触悬挂的构件，由支柱设备、腕臂装置、软横跨、硬横跨等组成。

（1）支柱设备。包括支柱和基础。接触悬挂支柱有钢柱和预应力钢筋混凝土柱两大类。钢柱可用角钢、槽钢或工字钢制成，一般质量较重，安装时需另设基础。预应力钢筋混凝土柱截面有工字形及环形两种。前者钢筋利用比较充分，但生产、运输比较困难；后者制造、运输比较方便，但钢筋利用不够充分。钢筋混凝土柱为整体式，安装时不需另设基础，仅加底板，有时加横卧板。

（2）腕臂装置。图5所示为采用最多的直线中间柱单腕臂装置，主要由腕臂、拉杆、定位器等组成。图中腕臂的一端悬吊接触悬挂，并与拉杆相连；腕臂及拉杆的另一端装有绝缘子，经底座固定在支柱上，以底座为轴心沿线路方向转动。人们将这种腕臂称为绝缘旋转腕臂。腕臂一般用型钢或钢管制成，拉杆则多采用圆钢或钢管。定位器由钢管或铝合金制成。

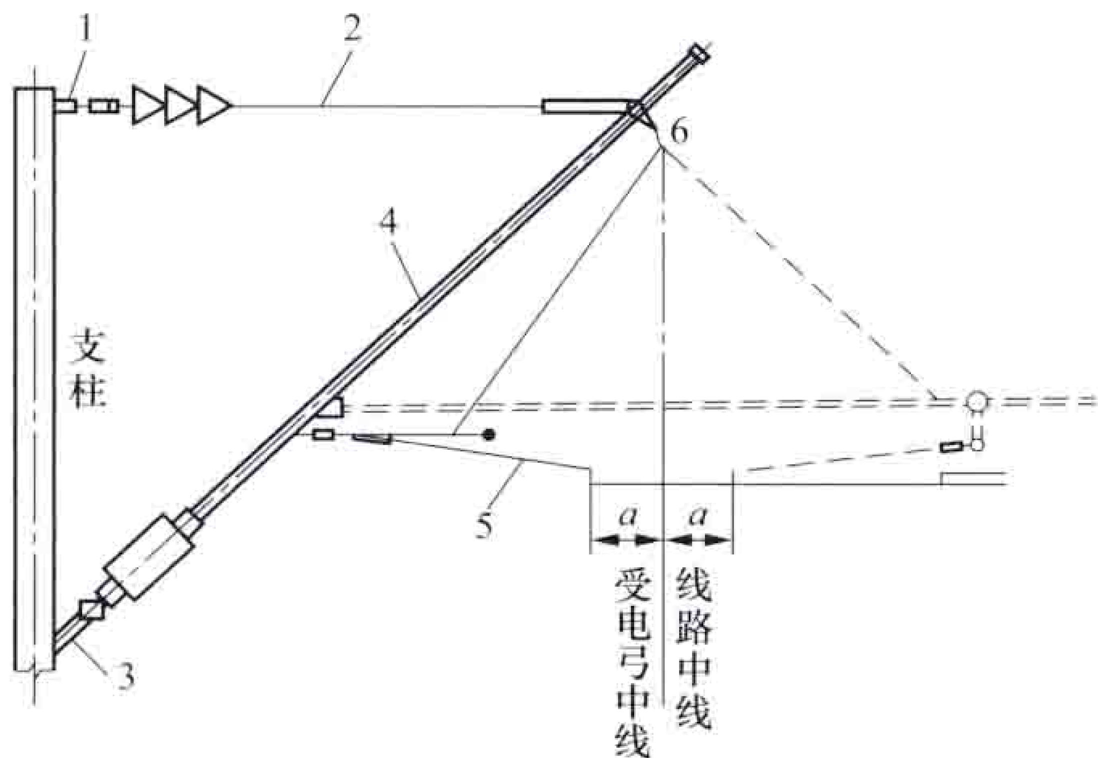


图5　直线中间柱腕臂装置
（虚线部分用于反定位）
1—拉杆底座；2—拉杆；3—腕臂底座；4—腕臂；5—定位器；6—承力索；a—拉出值（≤300mm）

（3）软横跨。由横向承力索及定位绳组成的支持装置，用于悬吊多支接触悬挂，如图6所示。横向承力索及定位绳采用钢绞线。横向承力索可用1根，也可用2根；定位绳采用1根，通过绝缘子串固定在线路两侧的支柱上。绝缘子串根据需要增减。

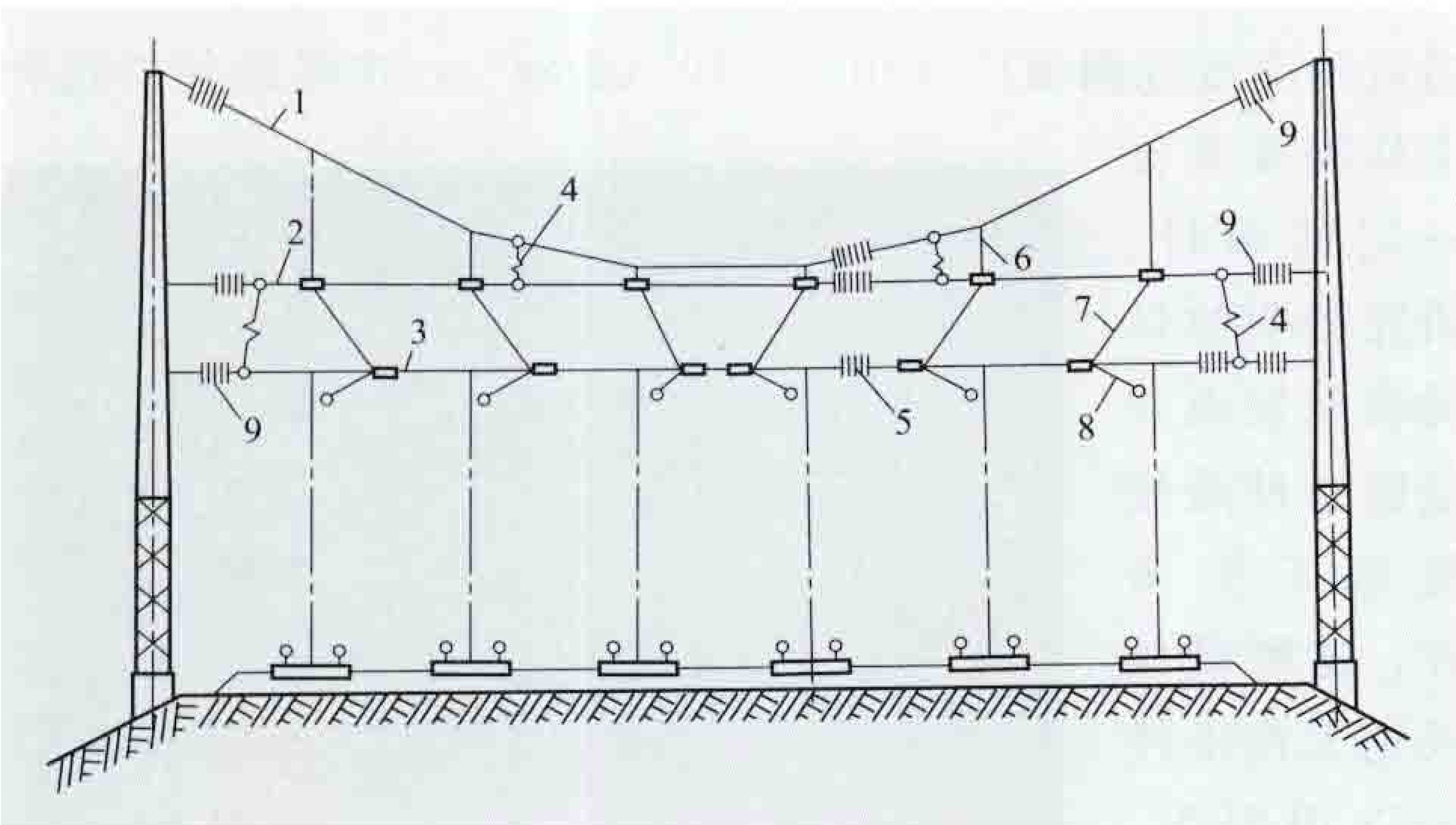


图6　双绝缘软横跨
1—横向承力索；2，3—上部与下部定位绳；4—电连接线；5—分段绝缘子；6—吊弦；7—定位器吊弦；8—定位器；9—绝缘子

软横跨结构轻巧，安装方便，弹性较好，但稳定性较差，支柱高度及容量较大，主要用于股道较多的站场，跨越股道数一般不超过8股。

（4）硬横跨。由硬横梁组成的“门”形支持装置，硬横梁固定在线路两侧的支柱上，适用于悬吊多支接触悬挂，如图7所示。硬横跨稳定性较好，但跨越股道数多时结构复杂，主要用在车站及多线桥上。

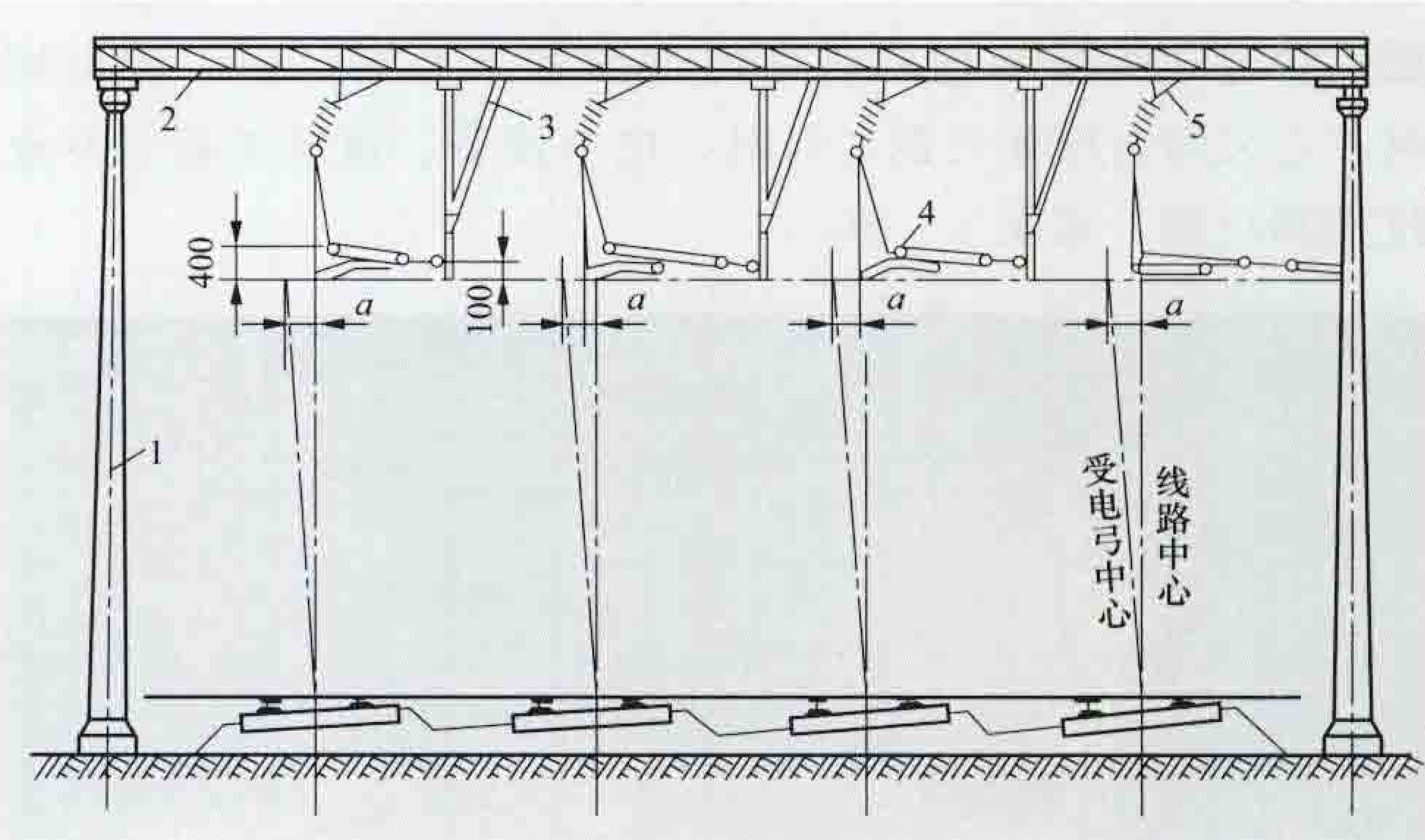


图7　带定位支架的硬横跨
1—支柱；2—硬横梁；3—定位支架；4—组合定位器；5—三角吊索；a—拉出值

dianqi shebei fanghuo

电气设备防火　(flame prevention of electrical equipment)　防止电气设备发生火灾的措施。电气设备的过热和发生电弧或电火花等引起的火灾称为电气火灾。电气设备的绝缘，大多采用易燃物如绝缘纸、绝缘油等组成，在运行中导体通过电流会发热，开关切断电流会产生电弧，电气短路或接地故障及设备损坏等可能产生电弧及电火花，这些都可能将周围的易燃物引燃而导致火灾。

电气火灾特点　包括：①发生电气火灾后，电气设备可能仍然带电，在一定范围内存在接触电压和跨步电压，灭火时如不注意或未采取适当的安全措施，就会引起人体触电伤亡事故；②发生电气火灾后，充油电气设备，如变压器、油断路器、电容器等受热，有可能喷油甚至爆炸，造成火灾蔓延并危及灭火人员的安全。

防止电气火灾措施　包括：①改善环境条件，在土建等方面采取措施，排除各种可燃易燃物质和易燃气体；②提高充油电气设备建筑物的耐火等级，对电气火灾危险场所的建筑采取隔离和遮阳措施；③提高电气设备本身的绝缘强度和耐火条件；④采取降温措施，避免电气设备过热；⑤限制电气设备或线路过负荷使用。

扑灭电气火灾注意事项　包括：①扑灭电气火灾时，应根据起火场所和电气设备的具体情况，首先切断电源，再进行扑救，以防触电。②如情况危急或其他原因不允许或无法立即切断电源时，要进行带电灭火。带电灭火要采取有效的保安措施，防止发生触电和火灾引起的爆炸事故。灭火人员与带电设备应按规定要求保持足够的安全距离。③应使用不导电的灭火剂灭火，包括干粉灭火剂、二氧化碳灭火剂、1211灭火剂、四氯化碳灭火剂等，禁止使用泡沫灭火剂灭火。

dianqi zhaoming

电气照明　(electrical lighting)　利用电光源产生的光照亮物体及周围环境使其能够被视觉到的设施和技术。电气照明是电力事业最早开发的应用领域之一。

电气照明具有科学技术与艺术相结合的特点。在科学方面，它吸收了物理学、电工学、电子学、建筑学、生理光学、心理学、人类工效学等基础学科的研究成果；在艺术方面，它遵守美学和色彩科学的各项基本原则；在工程应用时，它又综合应用光源、灯具、电气设备、建筑工程等专业技术和经验，见图1～图3。



图1　中国西藏拉萨市布达拉宫广场节日夜晚盛况

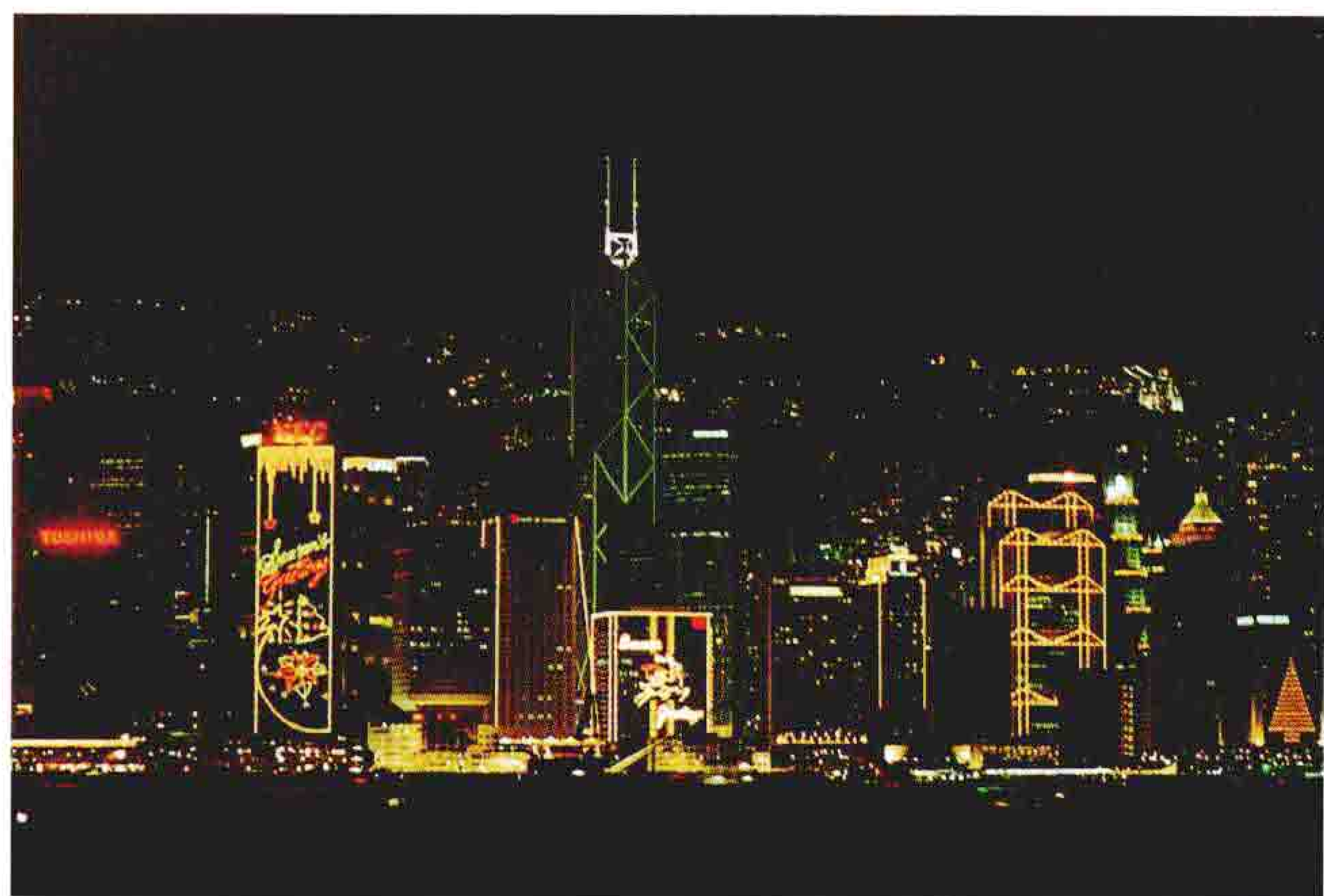


图2　香港岛中环附近夜景（肖辉乾　摄）

简史　最早发明的电灯是碳丝灯。1879年10月，美国发明家T. A. 爱迪生（Thomas Alva Edison，1847—1931）发明的碳丝灯构成了现代白炽灯的雏形。他预见到电灯的推广将会对社会进步产生巨大影响，并亲自组织灯的生产和创办电力公司，增加电力供应，由此开辟了电气照明的新时代。

20世纪的前10年，英国、美国、德国等相继成立了照明学会。1913年国际照明委员会（CIE）成立，在光的计量标准和测量方法标准化方面展开了工作。中国照明学会（China Illuminating Engineering Society，CIES）成立于1987年6月1日，是在国际照明委员会中代表中国的唯一组织。

白炽灯发明大约50年以后，另一类新型的灯——气体放电灯问世。1932年出现的低压钠灯和1935年研制成功的高压汞灯开始应用于街道照明。1939年荧光灯投放市场，使照明发生巨大变化，并被称为第二代光源的开端。荧光灯的光效和寿命比白炽灯高4～5倍，发光面大，表面亮度低，很适于作工厂、商店、办公室的照明。荧光灯的出现使人们有可能以同样的能源和费用获得比白炽灯照明更高的照度水平，也促进了对照度标准、眩光评价和灯的显色性等许多照明应用问题的研究。

20世纪60年代中期，两种光效更高、寿命更长、输出光通量更多的新光源——金属卤化物灯（1964年）和高压钠灯（1965年）研制成功，标志着电气照明迈入高强度气体放电灯（HID灯）的新时代。

70年代中发生的世界性石油危机促进了照明节能产品的开发。1973年发现的发光效率与光的颜色俱优的三基色谱带荧光粉是对改善荧光灯性能的突破性进展。1978年用这种荧光粉制成直径26mm的细管荧光灯光效接近100lm/W，显色指数达90以上。

80年代初用上述荧光粉制成低色温紧凑型单端荧光灯。这种小功率（7～13W）节能荧光灯的照明效果与白炽灯近似，而光效与寿命却高出5倍，优越性显著，将逐步代替白炽灯。与此同时，电子镇流器、电子控光设备开始进入照明领域；与空调设备相结合的照明器，与办公家具一体化的照明，使用HID灯的间接照明等节能照明方式也获得推广应用。

90年代开始应用的高频无极感应荧光灯利用高频电流直接激发荧光粉发光，没有电极，体型紧凑，功率有55、85、165W等数种，光效在70lm/W以上，寿命可达60 000h以上。90年代后期又推出微波硫灯，体积小，灯的直径约为35mm，寿命在5000h以上，光效在86lm/W以上，色温在5500～6500K之间，点灯10 000h后的光衰小于3%。

20世纪60年代出现单色发光二极管灯（LED）光源，到90年代先后推出白光LED和有机发光二极管（OLED）固态光源。因LED光效高、寿命长、色彩丰富、便于控制和安全等优点在景观照明、灯光标志、广告照明和显示照明等方面得到推广应用，同时在道路与室内照明中的应用也越来越广泛；OLED与发光面极小、指向性很强的LED相比，它是漫射的白光源，光效可达100lm/W，一般显色指数接近100，寿命长达20 000h，还具有灯体轻巧、使用方便、灵活性大、无眩光等优点。

照明条件　人的视觉离不开光，而人眼对光的反应能够适应的亮度范围很广（10^{-6}～10^{6} cd/m^2），这样最佳的视觉工作需要具备一定的条件。研究照明的目的就是发现并创造这种最佳视觉工作条件。这种最佳视觉工作条件可以用照度、环境亮度、眩光限制、灯的光色质量等来衡量。

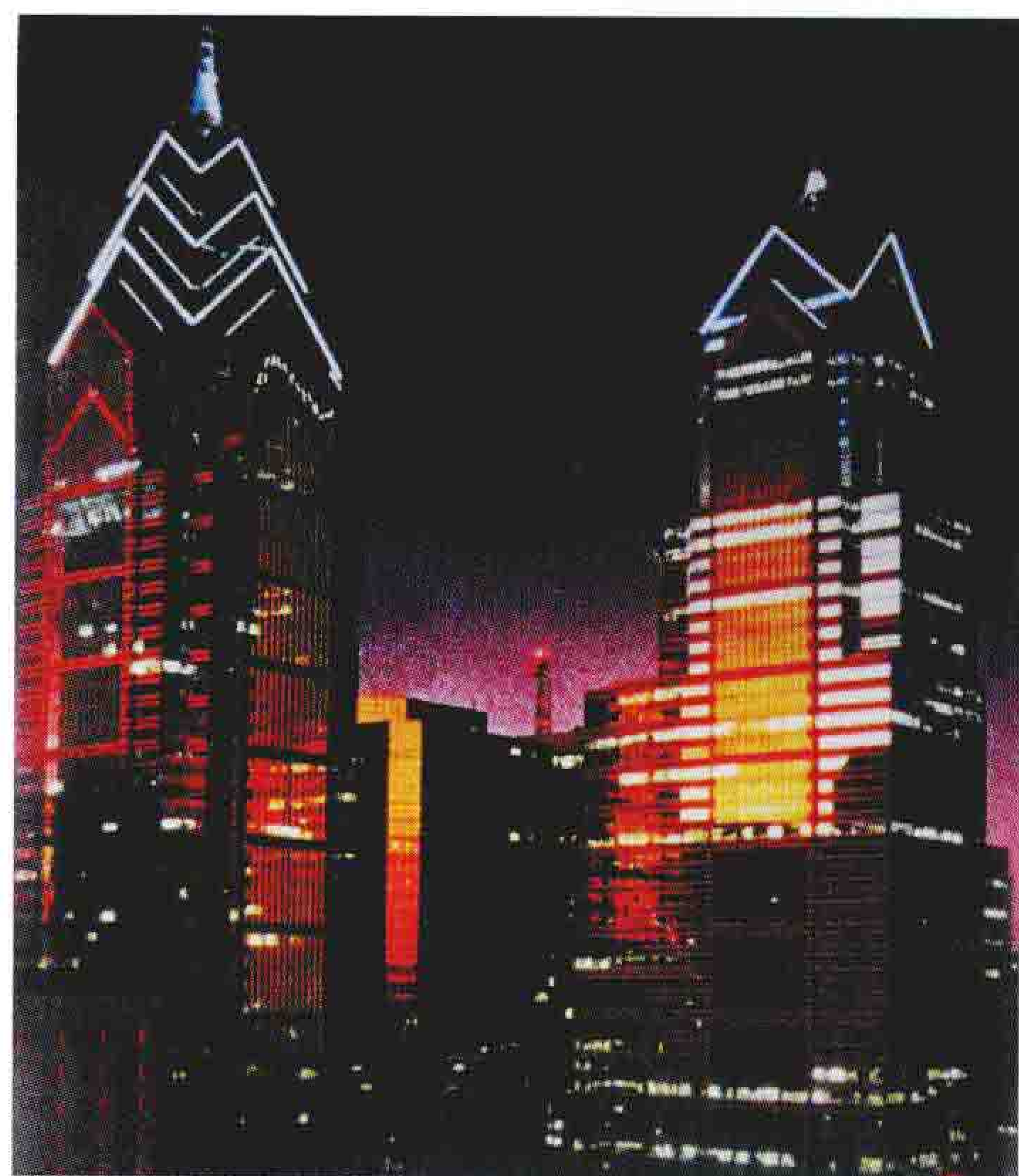


图3　美国费城某大楼顶部导光管轮廓灯夜景

照度　眼睛辨认细节的能力和对亮度差别的感受能力在一定范围

内都随照度水平的上升而提高。图 4 所示中国青年工人的视觉功效曲线表明，为达到一定的视觉作业速度和精确度，作业尺寸越小，亮度对比越差，就需要越高的照度。一般认为工作照明的理想照度为 500～1000lx，但作为设计标准还要考虑经济和能源供应的因素。

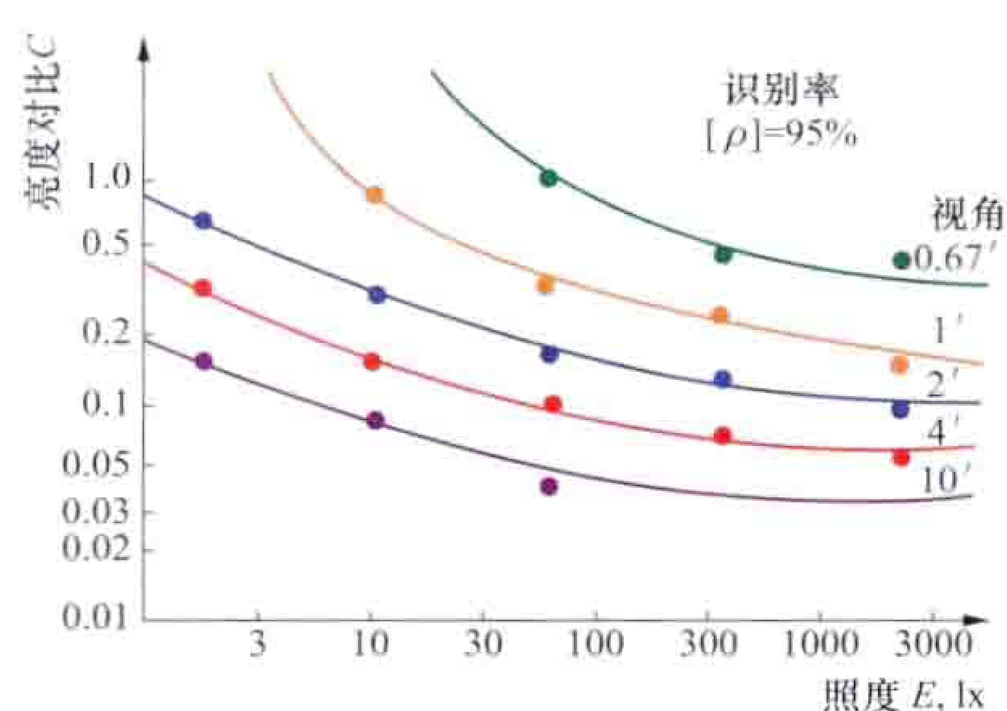


图 4　中国青年工人的视觉功效曲线

环境亮度　人眼有向光的特性，它自然地被明亮光线所吸引，所以，作业对象应当置于视野中最亮的部位。另外，人的视野很广，进入视野的周围作业环境的亮度将对眼睛的适应亮度水平产生影响。此外，在长时间连续工作的情形下，眼睛需要短暂休息，这时人的视线会从作业对象上移开。如果环境亮度与作业亮度差得太大，就容易造成视觉不适，导致视觉疲劳。在工作环境中，作业对象、贴邻环境（如桌面）和外围环境（如顶棚、墙、地面）的平均亮度保持在 1∶1/3∶1/10 范围以内为宜。（见亮度）

眩光限制　无论是不舒适眩光还是失能眩光，都是破坏视力、降低视觉功效的有害因素，需根据工作性质和环境条件，不同程度地进行控制。（见眩光）

灯的光色质量　气体放电光源的相对光谱功率分布与日光或白炽灯很不相同，因而在灯的色表和显色性方面有着明显的差异。选用气体放电灯作照明光源时要特别注意它们的光色质量。（见显色指数）

照明应用　根据照明功能和照明方法的特点，将照明应用领域分为室内照明、室外照明以及其他非视觉照明。

室内照明　建筑物内部的照明。每一类建筑物都包含用途不同的各种房间，就其照明而言，它们分别属于工作照明、陈列照明、休息娱乐照明、医院照明、室内运动照明和交通区照明中的一种或几种的组合。

（1）工作照明。办公、生产、学习等工作房间照明的主要目标是按照其视觉作业的特点为工作区提供良好的视觉条件；其次是为使用人创造一个有益于提高工效和增进健康的视觉环境。

（2）陈列照明。主旨是获得引人注目而且重点突出的展示效果，把展品的优点充分表现出来，如商品的展示。陈列照明适于采用变动灵活的照明设备，如导轨灯、点射灯，同时注意展品、观众和光源的相对位置，避免对观众或顾客产生镜像反射和眩光；在博物馆和美术馆中，还应特别重视灯的显色性能，以防止过强的光辐射（特别是紫外辐射）造成展品褪色或老化。

（3）休息娱乐照明。供居住、娱乐、交谊活动的房间照明。视觉舒适和艺术气氛是这类照明的主旨。

（4）医院照明。照顾到医护人员和病人两方面的不同要求而设置的照明。照明光源的色表、显色性及周围环境的颜色无论对于保证正确诊断和治疗，还是从减轻病人精神负担，建立和谐平静的气氛以帮助病人康复来说都是重要的因素。

（5）室内运动照明。应使运动员和观众都有良好的视觉条件，以便运动员在竞技中能发挥他们的速度和准确度，观众观看比赛也不感到疲劳。在需进行电视转播或电影摄影的场合，光源要有较好的显色质量（显色指数 $R_a \geqslant 80$），比赛场地要有较高的照度（≥1000lx）和照度均匀度（$E_{min}/E_{max} \geqslant 0.4$）。最好用金属卤化物灯照明。

（6）交通区照明。在门厅、走道、楼梯间，照明主要用来判别走向和保证安全，因此这些地方的垂直照度比水平照度更重要。为便于设计与评价，这些公共交通区域仍以水平照度为照明的评价指标。居住人数众多的高层建筑和人员密集的大型公共建筑的交通区必须有供紧急疏散的独立的应急照明系统。

按照上述几类照明，结合具体建筑条件（空间大小、结构形式、室内布局、建筑艺术风格等），室内照明有一般照明、分区一般照明、局部照明、混合照明、重点照明等不同的照明方式。

室外照明　包括道路交通照明、工作场地照明、运动场地照明和城市景观照明。（见城市照明）

（1）道路交通照明。确保交通安全，提高道路和其他交通设施的利用率，美化城市环境的照明，包括道路照明和交通信号灯两部分。

道路照明指街道、公路、桥梁、隧道和交通枢纽的照明。道路照明以机动车辆司机行车时能迅速、准确地判别前方 60～160m 范围内路面上的障碍物作为设计依据。1977 年国际照明委员会颁布道路照明推荐标准，以路面平均亮度、路面亮度均匀度和阈值增量作为评价道路照明质量的指标。中国的 CJJ45—2006《城市道路照明设计标准》规定：机动车交通道路照明以路面平均亮度（或路面平均照度）、路面亮度总均匀度和纵向均匀度（或路面照度均匀度）、阈值增量、环境比和诱导性为照明效果的评价指标；以照明功率密度值作为机动车交通道路照明节能的评价指标；人行道路照明以路面平均照度、路面最小照度和垂直照度为评价指标。

交通信号灯指道路交叉口、机场跑道、铁路车站、港口等处设有指挥交通、导航、调度用的各种信号灯，它们是交通照明的重要组成部分，见图 5。灯的大小、形状、数量、位置和灯光的颜色、发光强度、频闪周期等均有国际通用的专门规定。



图 5　交通信号灯

（2）工作场地照明。露天仓库、公共工程和建筑施工工地夜间作业的照明，采用投光灯或吊挂式照明器，安装方便灵活，有时用可移式照明器。

（3）运动场地照明。按照运动器材种类和特征、运动速度、场地规模和等级等因素，对不同类型运动场地规定

不同的照度水平和照度均匀度。大型足球场采用四角高塔集中投光照明或沿场地两侧看台挑棚成带状设置投光照明。光源以金属卤化物灯为宜。

(4) 城市景观照明。有纪念性和艺术价值高的建筑物、公共工程［如法国的埃菲尔铁塔、澳大利亚悉尼歌剧院（见图6）、中国的南京长江大桥、中国绍兴护城河（见图7）等］的立面照明，配合公园、绿地、雕塑、喷泉、广告等的各种照明，起美化城市夜间面貌、渲染节日气氛的作用。这类照明的灯光配置主要根据照明对象的材质、颜色、形状、周围环境和要达到的艺术效果而定。照明位置和投光角度的选择非常重要，既要使照射对象的形体和艺术特征得到充分表现，又要尽量隐蔽，不致对行人造成眩光。（见景观照明）



图6　澳大利亚悉尼歌剧院和海港大桥夜景



图7　中国绍兴护城河灯光秀

非视觉照明　非视觉领域电光源（包括红外灯和紫外灯）的照明。如农业上利用灯光加速温室植物生长，驱赶害虫，提高养鸡场鸡蛋的产量；工业上利用红外辐射进行烘干，用紫外灯检漏和使油墨固化；医疗保健方面以紫外线灯杀菌，用红外辐射和紫外辐射作保健照射和进行治疗；在摄影、复印、电影放映等实用技术方面的应用。

展望　重视照明质量和节能是电气照明的两大发展趋势。荧光灯、高压钠灯、金属卤化物灯、LED的用量将逐年增加，白炽灯将被淘汰；新光源不断涌现，更多的电子器件与智能控制设备（无线控制、载体控制与天然光和人工光联合控制等）将进入照明工程；人们更加注重电气照明带来视觉舒适的感受。

dianqi zhaoming jiedian jishu

电气照明节电技术　(electricity saving technology of lighting)　降低电气照明电能消耗的措施与方法。电气照明是利用电光源将电能转换为光能的人工照明。它是电能最早的应用领域，已有百余年的历史。照明设备包括电光源及附件和灯具（见照明器）。照明设备的单台用电功率普遍较小，但社会的拥有量很大。照明节电的措施有选用高效的电光源和灯具、合理地进行照明设计、合理地控制照明时间、充分利用自然光等。另外，对功率因数低的电光源（如高压气体放电光源），设置电容器进行无功补偿，对照明器定期进行清扫，对发光效率已劣化的电光源进行及时更换等，都是照明节电的有效方法。

选用高效电光源和灯具　在保证照明质量的前提下，降低照明用电量的根本措施就在于提高照明设备的效率，即提高电光源与灯具的效率。具体措施包括合理选择高效电光源、合理选择节能镇流器、合理选择高效灯具。

合理选择高效电光源　电光源技术发展很快，产品种类繁多，功率大的电光源达200kW，功率小的灯泡仅有0.06W。选择照明光源时，在满足场所对光源的色温、显色性要求和一定寿命要求的基础上，应选择发光效率高的电光源。常用电光源的显色指数、发光效率和寿命见表。可以看出，发光二极管灯、高压钠灯、金属卤化物灯、细管径直管荧光灯等的发光效率均超过100lm/W，无极荧光灯、节能灯等的发光效率也达到70～80lm/W，而普通照明白炽灯的发光效率只有15lm/W。

常用电光源的显色指数、发光效率和寿命

光源种类	显色指数	发光效率(lm/W)	寿命(h)
白炽灯	100	15	1000
卤钨灯	95	19～35	3000
粗管径直管荧光灯	65	60	5000
三基色细管径直管荧光灯	80	90～108	8000
三基色紧凑型荧光灯（节能灯）	80	50～80	6000
无极荧光灯	80	80	60000
高压钠灯	25～60	130	20000
高压汞灯	45	60	6000
金属卤化物灯	65～93	100	12000
陶瓷金卤灯	80～92	100	15000
发光二极管灯（LED）	60～80	50～160	25000

根据工作场所对照明的要求，选择显色性好、寿命长、发光效率高的电光源，可以取得明显的节能和经济效益。中国政府自1996年启动实施中国绿色照明工程，先后将其列入“九五”“十五”节能重点领域和“十一五”“十二五”重点节能工程，并与联合国开发计划署、全球环境基金开展了3期淘汰白炽灯推广节能灯的绿色照明国际合作项目。

合理选择节能镇流器　镇流器作为荧光灯和高压气体放电灯燃点时限制工作电流的电器附件，自始至终有电流通过。因此，镇流器自身的能耗在整个照明系统的能耗中占有相当大的比重。早期的普通电感镇流器内阻大、功率因数低，其自身能耗占整灯损耗的20%～25%；而采用高纯度铜材和高导磁铁芯材料制成的节能型电感镇流器，可将其自身能耗降低约1/3。电子镇流器工作时将工频交流电源转换

成高频交流电源，不仅可使荧光灯的发光效率提高10%，而且其自身能耗极低，只占整灯损耗的3%～5%，是符合国家节能环保产业政策的产品。

合理选择高效灯具　灯具的作用是固定电光源，把光源发出的光能分配到需要的方向，防止光源引起的眩光，保持光源不受外力和外界环境产生的影响。灯具还具有装饰作用。灯具的选择，既要考虑视觉的要求，又要考虑使用环境的特点，同时还应满足装饰的需要。在正常环境中宜选用开启型高效灯具，除特殊场合外，一般不宜选用效率低于55%的灯具。

合理地进行照明设计　照明设计包括照明方式的选择、照度的选定、照明器的选择等内容（见电气照明设计）。不同的工作场所对电气照明有不同的要求，进而产生了不同的照明方式。照明方式分为一般照明、局部照明和混合照明。一般照明指在整个场所或场所的某部分照度基本上均匀的照明；局部照明是仅局限于固定的或移动的某一工作部位的照明；混合照明则是一般照明与局部照明共同组成的照明。选择照明方式时应注意：对照明方向和光照质量无严格要求的场所，宜选用一般照明，这样可以用大功率高效光源，以减少照明器数量，节省投资；对需要高照度有照射方向要求的场所，宜采用局部照明；对照度、光照质量、照射方向有不同要求的场所，宜采用混合照明。混合照明中的一般照明与局部照明的照度比最大不能超过1∶10。

适合工作视觉要求的照度，是保护视力、提高劳动生产率和产品质量的重要条件。各国对工作场所和工作面上的最低照度值均有规定，在确定照度时，可按工作场所和照明对象的具体要求从中选取。

合理地控制照明时间　照明时间应根据需要掌握，随用随开，这是节电的一项有效措施。因此，对每一个照明设备应配置一个开关，同时再配以自动控制装置，这样就可按实际需要来控制照明时间、开灯数量，以消灭长明灯。如路灯可采用光电照明控制，楼道和走廊可采用光控、声控或延时自停开关等。

充分利用自然光　充分利用自然光是实现照明节电的重要部分。在设计建筑物采光时，选择效率高、性能好的采光方式，是充分利用自然光的基础。在进行室内装饰照明设计时，采用反射系数高的装饰材料，以便有效利用自然光。此外，利用夏季光照时间长的特点，实行夏时制也是节约照明用电的一项有效措施。

dianqi zhaoming sheji

电气照明设计

电气照明设计　(electric lighting design)　综合电气照明和相关技术，科学合理地做出实施照明计划和方案的工作。照明设计的主要任务是从深入分析被照对象的特征入手，全面考虑影响照明功能的因素以及照明对象的工艺要求、环境条件，依据照明设计相关标准、照明产品发展技术水平，在技术经济合理的条件下，做出实施电气照明的计划和设计方案。其最终成果应能体现：符合建筑室内外功能和艺术特征；保护人们视力的健康；提高产品质量、劳动生产率和文化艺术品位；做到既美观，又节约能源，技术先进，经济合理、使用安全和维修方便。

电气照明方案的形成，首先要研究设计对象的特征和它对照明的要求，而后确定照明设计标准，选择照明方式和照明设备，进行照度计算和经济分析，提出照明布置方案，并对照明装置进行电气和细部设计，最后检验照明方案是否符合设计要求。

分类　根据照明对象的不同，通常把电气照明分为功能照明和景观装饰照明两大类，两者设计思想与手法不同。①设计思想不同。功能照明主要要求有适宜的照度或亮度，为人们提供一个良好的视看条件；景观装饰照明主要根据创造环境气氛的需要，讲求照明的艺术效果和研究照明心理方面的影响。②设计手法要求不同。功能照明需要足够的照度，照度分布应均匀，一般其最小值与平均值之比应大于0.7，要求减少眩光，光源的颜色和显色性要好，方案要求节能经济；景观装饰照明则不同，重点放在光环境的气氛创造方面，照明的亮与暗的分布，光与影的搭配，均需根据气氛要求确定，照度分布不一定要求均匀，均匀反而呆板，眩光不一定严格限制，有时还要利用适度的眩光制造气氛或特有的艺术效果，有时利用阴影塑造光造型，光的颜色也可用夸张手法利用特殊色彩制造不同的环境气氛，如珠宝照明必须用低色温的光，冷食店则需用高色温的光，喷水池就要用彩色光等。这种照明要求的经济性，往往服从景观装饰的艺术需要。

按照明场所的不同通常分为室内照明、室外照明和特殊场所照明三大类。室内照明应用场所分为住宅建筑、公共建筑和工业建筑照明。按设计中经常遇到的场所又可分为住宅照明、办公室照明、宾馆饭店照明、体育场馆照明（见图1）、博展场馆照明（见图2）、商店照明、学校照明、住宅照明、剧场照明（见图3）、医院照明、工厂照明、演播场所照明等。室外照明又可分为室外功能照明与室外景观照明。室外功能照明有道路照明、广场照明、交通标志照明、隧道照明、机场与港口照明等。室外景观照明有建筑或构筑物照明、商业步行街照明、广场照明、公园照明、旅游景点照明和广告标志照明等。特殊场所照明按照明环境不同分为高低温场所照明、潮湿场所照明、有爆险场所照明、有腐蚀性气体场所照明和火灾危险场所照明五大类。



图1　中国国家游泳中心“水立方”夜景

要求　按照设计对象的用途、工作性质与景观特征等进行电气照明设计，不同的照明场所，设计要求亦不同。

室内照明设计应考虑的主要内容有：①照度及其均匀性；②光源的光色和显色性；③室内装修和光色的搭配及环境亮度；④眩光限制应达到标准规定的要求；⑤利用光的方向性体现材料的质感；⑥灯具（见照明器）的功能和装饰作用与建筑物的协调；⑦照明节能，照明功率密度值应达标准

要求；⑧经济性；⑨维护管理方便等。

室外道路照明设计应考虑的主要内容有：①路面的照度或亮度水平及均匀度、眩光、环境比以及照明的诱导性应满足标准的要求；②合理的经济性；③不应影响城市环境、干扰行人或市民的工作、生活与休息；④照明设施应便于维护管理；⑤在满足功能要求的前提下，考虑照明装饰与景观的整体效果等。

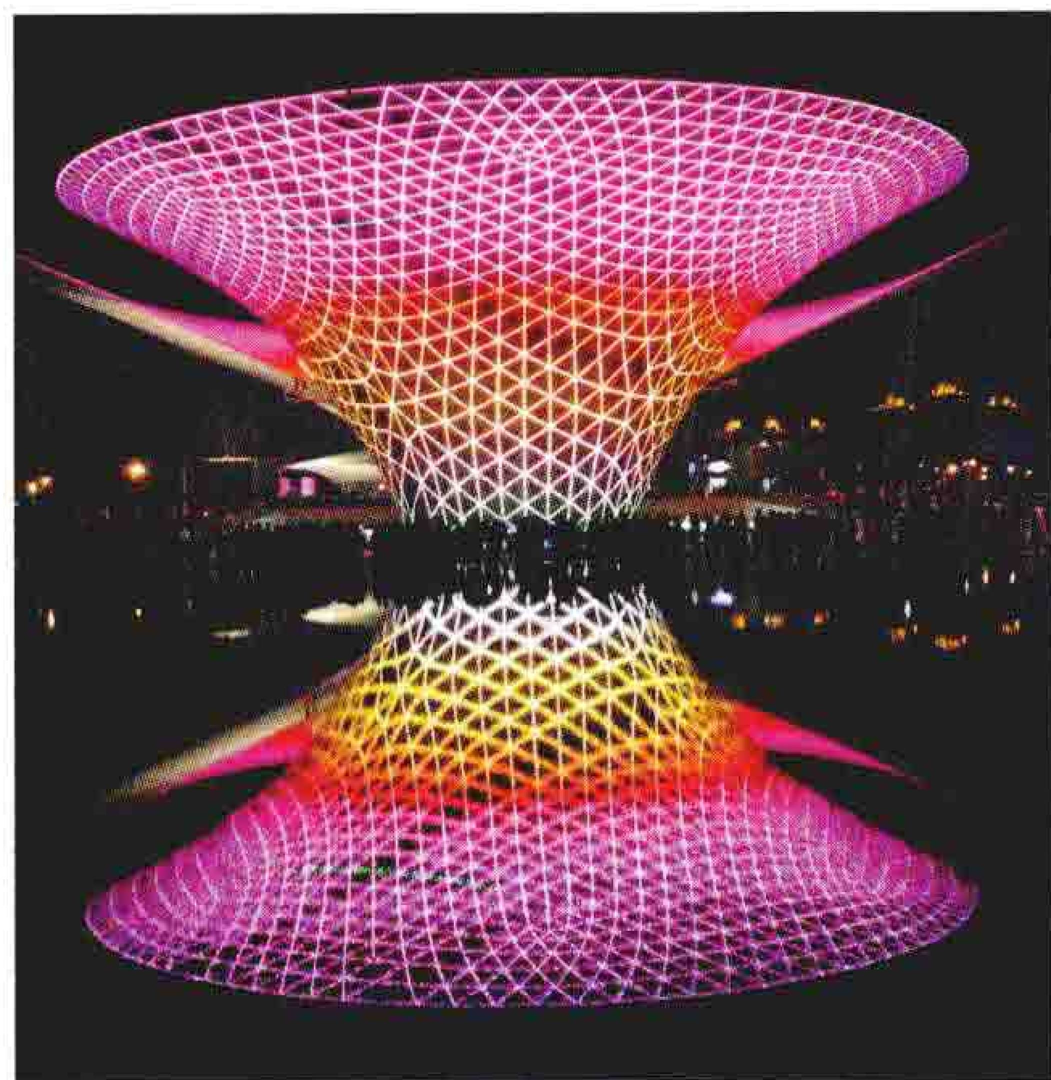


图 2　上海世博会世博轴夜景

室外机场、港口、码头等照明，应考虑的主要内容有：①照度及其均匀性；②光源的光色和显色性；③眩光限制应达到标准规定的要求；④照明节能，照明功率密度值应达标准要求；⑤经济性；⑥不应影响城市环境、干扰行人或市民的工作、生活与休息；⑦维护管理方便等。

室外景观照明设计应考虑的主要内容有：①按城市照明规划设计景观照明；②照度或亮度水平；③突出被照对象的主题与特征；④慎用彩色光；⑤照明设施应节约能源，保护环境，防止产生光污染；⑥推广应用 LED（发光二极管）固态照明与智能控制技术；⑦照明设施维护与管理的科学化与法制化等。

特殊场所照明的要求则应根据场所的特殊性选用耐高低温、防潮、防爆等防火的照明器材。

设计阶段和设计步骤　一般分为初步设计和施工图设计两个阶段，是否每个工程都需要这两个阶段取决于工程的规模和复杂程度。比较简单的工程不必做初步设计，直接做施工图设计即可。

初步设计的步骤为：①根据被照明对象的特征确定照明总体构思与创意；②确定主要的照明方法并选定光源种类；③确定供电方案和供电电源数量（1 个电源或 2 个电源）；④确定照明方式种类；⑤概算照明装置容量，常用灯数概算曲线法确定灯数并确定装置容量；⑥选定照明设备和配电设备，估算线路造价，最后列出总投资等。

施工图设计阶段的设计步骤为：①了解被照场所空间构成；②确定各部分视看要求的内容；③配合有关视觉的要求提出实现方法的概要；④确定实施方案，即选择光源和灯具；⑤对照明方案进行计算和反复修正；⑥灯具的配置（布灯）；⑦电气网络设计，布线并选择电气设备及线路；⑧方案的经济分析；⑨照明环境评价。

照明与节能设计　照明水平受经济水平和能源的制约，不同国家、地区或同一功能不同的建筑标准可能相差很大，必须按照当地的条件寻求最佳的符合实际的照明设计方案。国际照明委员会（CIE）于 1975 年发表了照明节能的声明，其指导原则是既要考虑节能，又不能牺牲或降低照明质量，以达到最有效、最人道、最科学地利用能量。

室内照明的节能方法与措施有：①照明设计时应分析视觉作业的困难性、持续性、危险性和位置，以便决定空间各处的照明要求，并把不同年龄及其他因素所引起的人的视觉差异考虑进去。②依照标准与规范设计照明，为视觉作业提供必需的照度。③选用发光效率高的电光源的同时，应考虑对光源的显色性的要求。④选用的灯具应是高效率的，并具有与作业和照明环境相适应的发光强度分布特性，防止产生不舒适眩光和光幕反射。⑤使用较高的、实际可能实现的室内表面反射比，保证整个照明系统能得到最高的效率。⑥根据气候条件，把照明和供热空调系统结合起来，以节省制冷和供热所用的能量。⑦合理设计照明控制系统，使之在不需照明时可分区关灯或减少照明。⑧在合适而且空间条件允许时，把天然采光和人工照明结合起来，但要保证在视觉环境中不引起眩光或亮度的不平衡。⑨建立合理的照明维护管理制度，定期换灯和清扫灯具与室内表面。

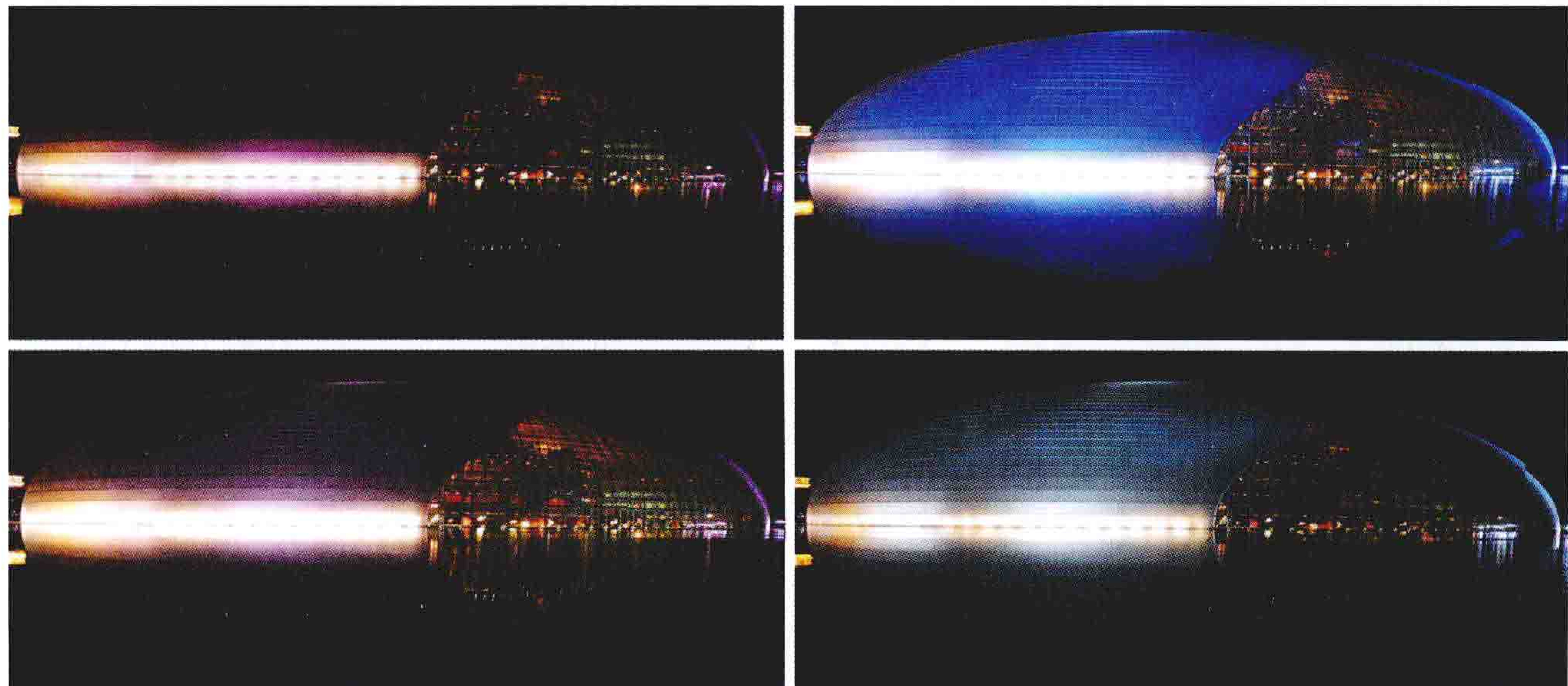


图 3　北京国家大剧院动态夜景

室外道路与景观照明节能方法与措施：①按城市照明规划确定照明的道路、建（构）筑物及景观照明对象；②按国家道路或夜景照明设计标准或规范规定的照度或亮度标准进行设计与建设；③选用高光效的照明光源与灯具；④气体放电灯线路功率因数，道路照明不应小于0.85，景观照明不低于0.9；⑤选用技术先进的控制方式，分时段控制灯的开关或降低光源功率；⑥按计划做好照明设施的维护管理工作；⑦通过充分论证，推广使用太阳能等可再生能源。

发展趋势　随着照明技术和建筑环境科学技术的迅速发展，人工光环境设计越来越引起照明工作者的重视，并逐步改变过去只考虑亮不亮或看不看得清楚的传统照明设计方法。光环境质量与照明节能在绿色建筑中所占权重越来越大。

为提高室内外光环境的质量，照明设计中除使用平面照度指标外，在不少国家开始采用平均球面照度和平均柱面照度，即空间照度指标作为照明设计标准，预计这些指标在照明设计中将会进一步推广应用。与此同时，设计中对影响照明环境的质量因素，如视觉环境的亮度比、眩光、对比显现、光源的色表与显色性以及灯具的配光性能等均需进行综合考虑。

由于电子计算机在照明工程中的大量应用，智能照明已应用于办公自动化（OA）、工厂自动化（FA）和住宅自动化（HA）建筑中。在智能建筑中，智能照明、供热、空调、通信及办公设备几乎都由电子计算机控制与管理。实现照明控制系统智能化的主要目的有：①提高照明系统的控制与管理水平，减少其维护成本；②节约能源，减少照明系统的运营成本。

未来通过数字信息仿真模拟建筑物的建筑信息模型，将被广泛应用于电气照明设计，它具有可视化、协调性、模拟性、优化性和可出图性五大特点，在项目策划、运行和维护的全生命周期实现信息共享与传递。

参考书目

李铁楠．城市道路照明设计．北京：机械工业出版社，2007.

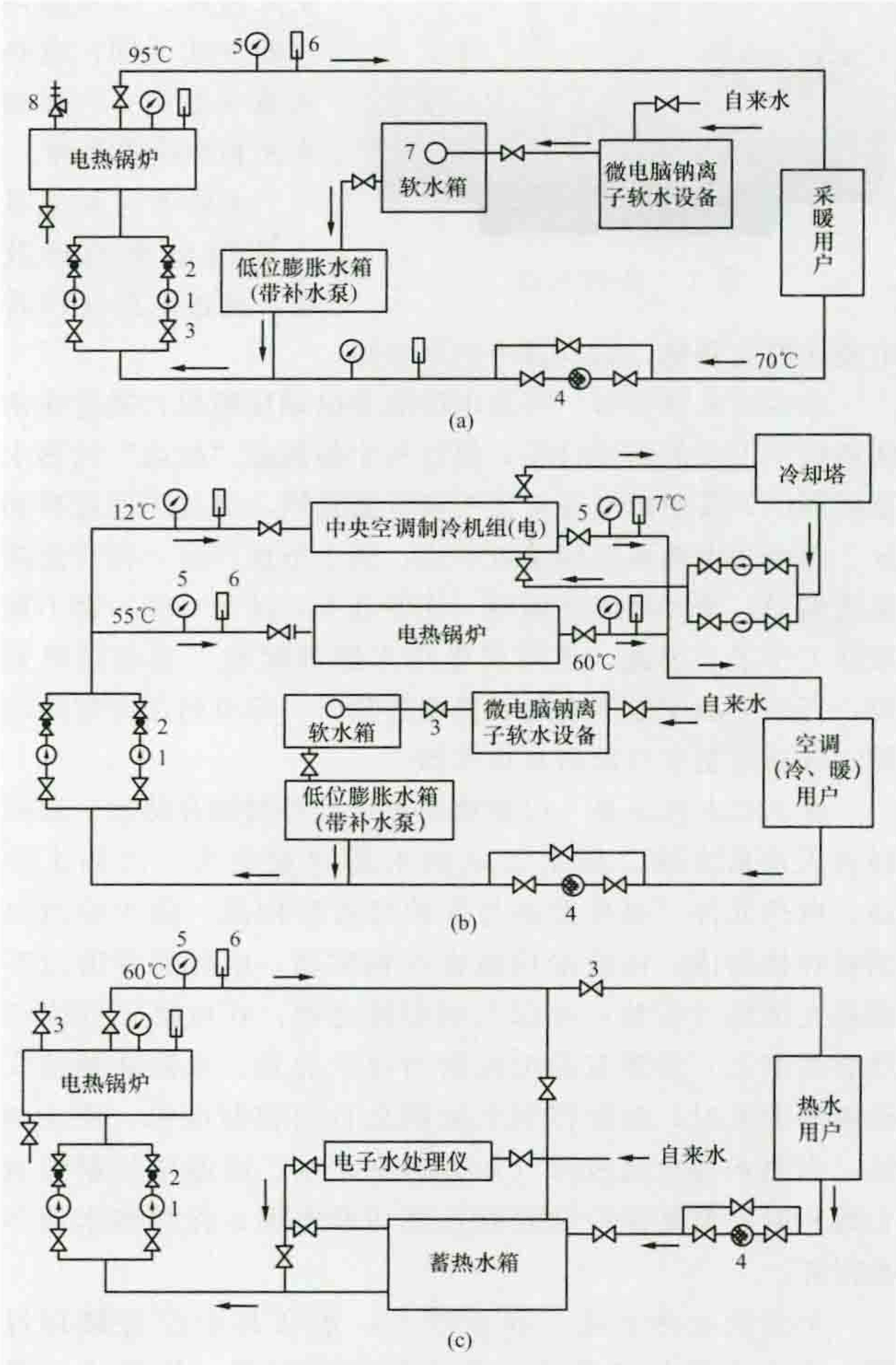
肖辉乾．城市夜景照明技术指南．北京：中国电力出版社，2004.

dianre guolu

电热锅炉　(electric boiler)　将电能转化为热能，把水加热至有压力的热水或蒸汽（饱和蒸汽）的一种热力设备，也称电锅炉。电热锅炉无需炉膛、烟道和烟囱，也无需储存燃料的场地，极大地减少了常规燃煤锅炉带来的污染。电热锅炉具有无污染、无噪声、占地面积小、安装使用方便、全自动、安全可靠、热效率高达98%以上等特点，是一种绿色环保产品。

许多国家在20世纪70年代后期开始研制开发电热锅炉。中国在80年代中期开始开发电热锅炉产品，90年代中期以后，电热锅炉开始在采暖、中央空调和热水供应等工业生产和社会生活中得到广泛应用。

电热锅炉是将加热元件装在一个受压的容器内，通电后，容器中的水直接吸收加热元件产生的热量，使被加热的水逐渐升温，从热水变为蒸汽，完成电、热、水三者之间的能量转换与传递的物理过程。采暖、中央空调和热水供应的热力系统见图。



电热锅炉热力系统图

(a) 采暖热力系统图；(b) 中央空调热力系统图；(c) 热水供应热力系统图

1—循环水泵；2—止回阀；3—闸板阀；4—除污过滤器；5—压力表；6—温度表；7—浮球阀；8—弹簧安全阀

电热锅炉分为电热蒸汽锅炉和电热热水锅炉两大类。

电热蒸汽锅炉　将水加热产生蒸汽的电热锅炉，又名电热蒸汽发生器。按结构分为立式和卧式两种。按产生的蒸汽压力分为低压、中压、高压三种规格。0.4MPa及以下工作压力的电热锅炉为低压电热锅炉，主要用于生活供热。0.7～1MPa的电热蒸汽锅炉为中压电热锅炉，可供生活、生产用汽。1.6MPa以上的电热蒸汽锅炉为高压电热锅炉，现多用于试验室。由于承压指标不同，在使用选型方面要注意区分。

电热热水锅炉　将水加热提供热水的电热锅炉。电热热水锅炉在结构上也分立式和卧式两种。随着锅炉功率的增加，电热热水锅炉有双头和单头之分。加热电功率在360kW及以下的卧式电热热水锅炉，大多做成单头；加热电功率大于360kW的电热热水锅炉，一般做成双头。热水温度小于95℃的电热热水锅炉，常用于供应开水或洗浴的场所。

dianreshuiqi

电热水器 (electric water heater) 利用电能加热方法提供生活用热水的家用电器。按照加热原理的不同，电热水器有电热式和热泵式两种。按照加热水的方式不同，电热水器（见图1）有储水式和快热式两种。

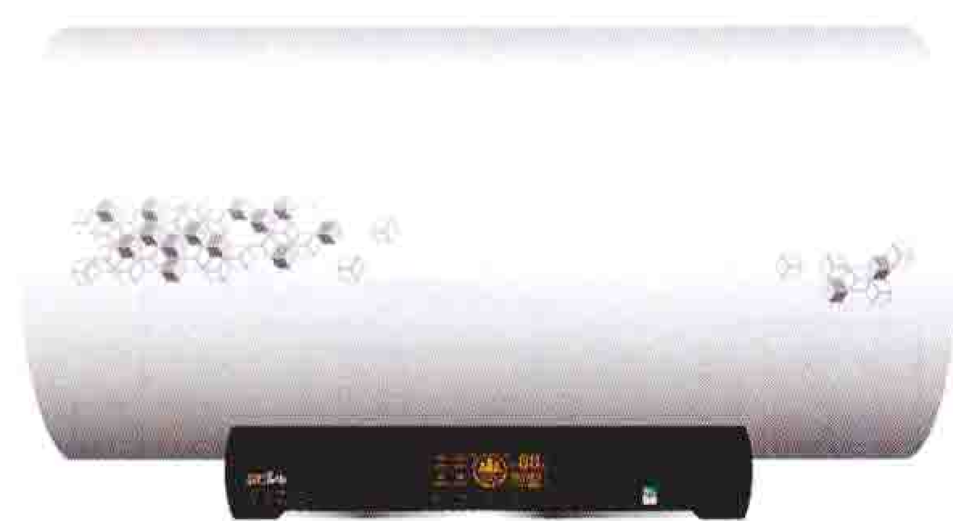


图1 电热水器

电热式电热水器 利用电流的热效应，通过电热元件将电能转换为热能，给容器中的水加热。

热泵式电热水器 利用电能驱动电动压缩机，通过在密闭系统中工质的相变过程，将空气中的热能“搬运”到热水器容器中，其原理与房间空气调节器相同，只是工作过程相反。热泵式电热水器用能效率高，属于节能产品，但其加热速度偏慢，当环境温度偏低（通常在5℃以下）时，就不能很好工作了。因此，热泵式电热水器都配有一套电加热系统，当空气温度偏低或需要快速加热时，即可启用电加热功能。常见的是空气源热泵热水器。

储水式电热水器 可在夜间用电低谷时储存热水，以减轻白天用电负荷。储水式电热水器容量较大，由储水容器、电热元件、温度控制与保护装置等构成。储水容器由钢板焊接而成，内壁采用搪瓷材料防腐；电热元件通过容器壁上的法兰安装，并深入到容器之中；在电热元件附近或容器壁上，设置有温度控制与保护装置。水温达到预先设置的温度时，温度控制装置就会自动切断电源，停止加热；当热水器出现故障（如容器中无水，或温度控制装置失效）时，温度保护装置就迅速切断电源，保护热水器不被损坏。

快热式电热水器 容积较小，水在其中没有储存过程，水在流经此容器的过程中就完成加热。快热式电热水器的电功率与水流速有着固定的匹配关系。通常可满足洗浴的水的流量不低于7L/min，而适合洗浴的水温为35～40℃，因此，快热式电热水器通常需要6kW以上的额定功率。如果追求洗浴的舒适性，产品额定功率需要做到十几千瓦甚至几十千瓦。一般家庭使用的快热式电热水器，其额定功率通常为8～10kW，额定流量为7～10L/min。

快热式电热水器有腔体式（见图2）和水槽式（见图3）两种。腔体式电热水器主要依靠橡皮膜的弹力来通断电源，冷水进入腔体后，借水流压力和重力使橡皮膜下凹，带动触头使电路接通，热水经通水管的小孔流入通水管内；无水进入时，依靠橡皮膜的弹力使触点断开，电路即被切断。水槽式电热水器主要依靠机电转换器来通断电源，当打开热水阀门，水流压力冲击机电转换器中的蝶形金属膜片，推动顶杆上升，使电路接通；无水进入时，蝶形金属膜片靠弹性恢复到原始位置而使电源断开。

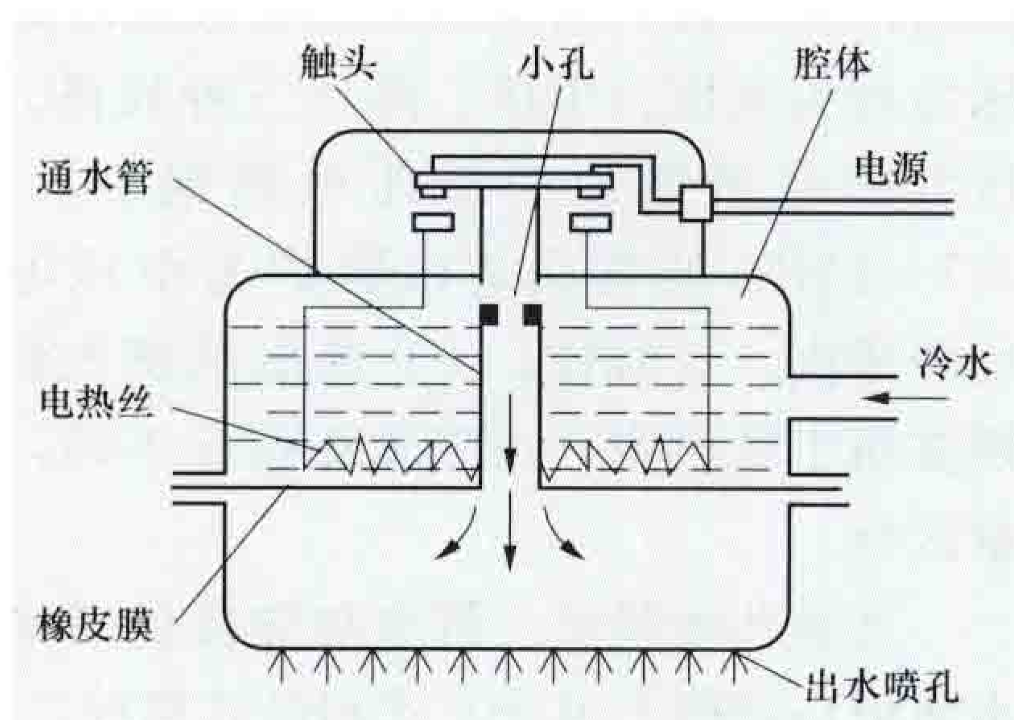


图2 腔体式电热水器原理图

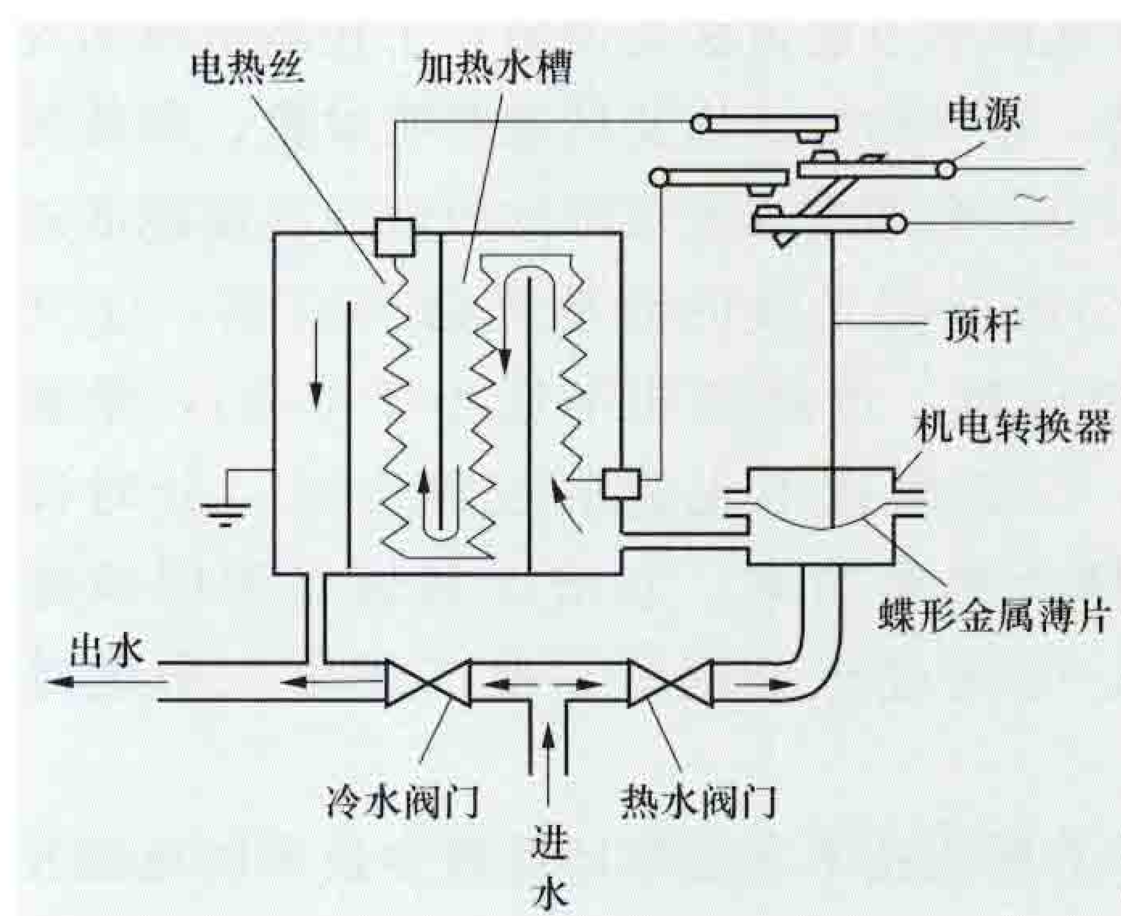


图3 水槽式电热水器原理图

dianretan

电热毯 (electric blanket) 在织物中置入电热元件使之具有取暖功能的一种柔性电加热家用电器。电热毯有单人型和双人型之分，有下铺型（仅供铺在被褥下面）和上盖型（盖在人身上面）之分。双人型电热毯可设计成两个发热区并分别控制，适合对取暖有不同需要的两个人共用。还有一种分温区电热毯，分别将与人体上部、腰部、腿部（脚部）接触的区域设计成不同的温区。

电热毯由织物面料和电热元件及控制电路组成。织物面料除了铺或盖的传统功能外，还起到隔离和固定电热元件的作用。电热元件按照一定方式均匀布设在织物面料的发热区中，通电后发热并使发热区温升提高。控制电路按照环境温度或设定温度控制电热元件的通电时间。

电热毯的核心部件是电热元件，其结构见图1和图2。为了抵抗拉拽、弯折等恶劣使用条件，电热元件的电热丝成螺旋形缠绕在耐热尼龙芯上。图1所示的电热元件本身不带温度传感器，为了控制电热毯温度，需要在电热毯中另外设置感温传感器。图2所示的电热元件自身带有温度传感器（信号线），当电热毯上任一点的温度超过预定值时，该处相应的感热层即由绝缘线变为良导线，使控制电路接通，电热毯断电，达到控温和安全防护的目的。

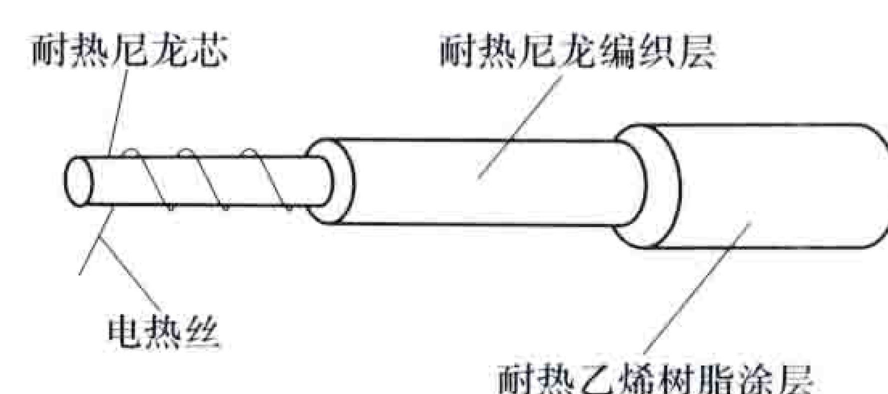


图1 不带传感器的电热元件

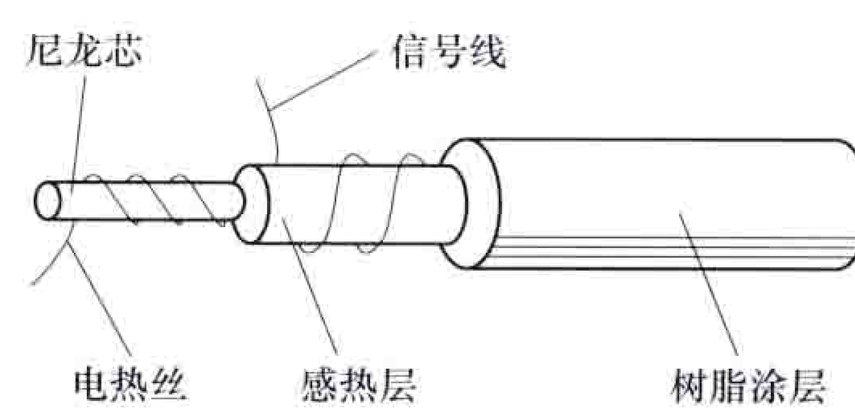


图2 带信号线型电热元件

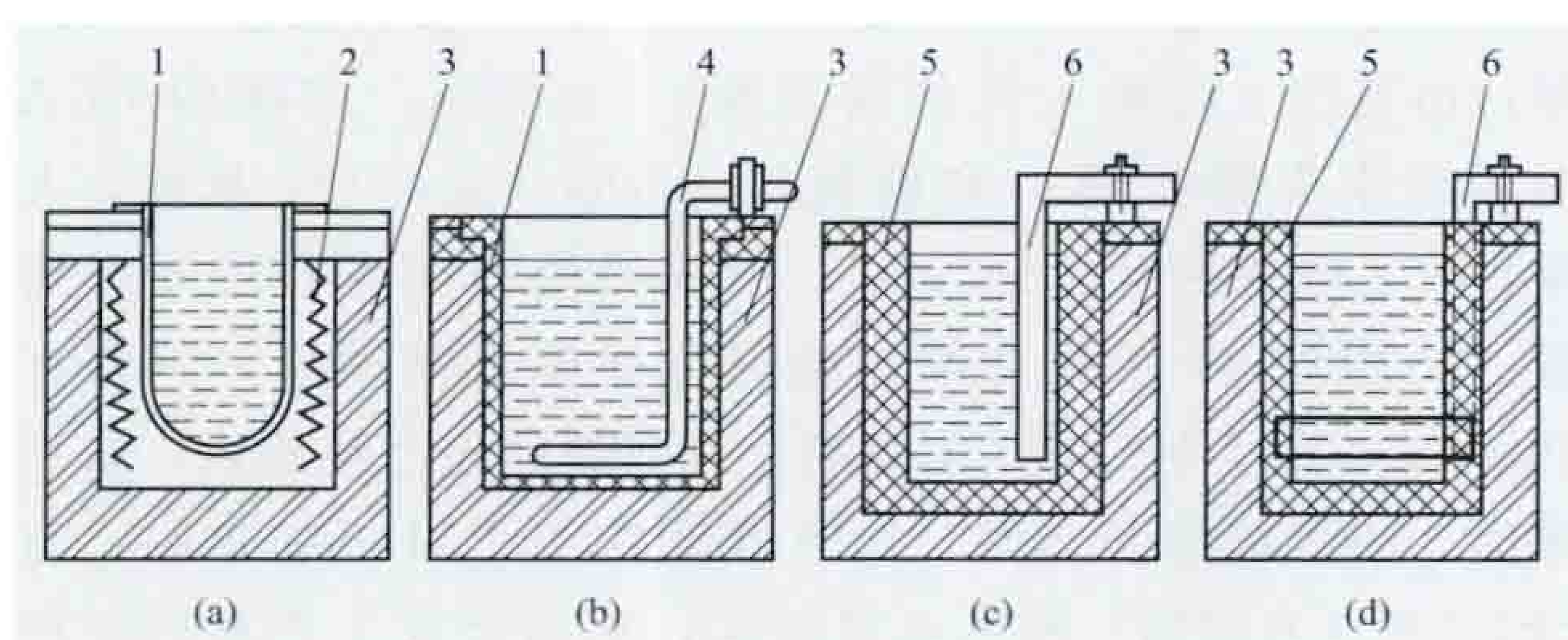
dianre yulu

电热浴炉 (electric bath furnace) 炉料浸没在处于工作温度下的液体介质中进行加热或冷却的电阻炉。主要用于碳钢、合金钢工件、工具量具和高速钢刀具的淬火加热、等温淬火及分级淬火时的冷却、局部加热与化学热处理。

电热浴炉加热的优点：①浴炉的热容量较大，在电磁搅

拌作用下，炉温较均匀；②工件与液体介质接触，综合传热系数大，加热速度快，工件变形小；③由于液体介质的保护，工件不与空气接触，可避免或减少工件表面的氧化和脱碳，使用适当成分的溶剂还可方便地进行渗碳、渗氮或碳氮共渗；④便于进行局部加热及高温短时快速表面加热；⑤电极盐浴炉结构简单，制造方便，用普通的钢材作电极就能达到1350℃的高温，在工量具生产中曾得到广泛应用。其缺点是：①盐浴炉装料少，只适用于中小零件加热；②经盐浴炉处理过的零件必须清除表面残留的盐液；③由于炉口向上敞开，热损失大，起动、脱氧和捞渣操作麻烦，浴炉的热效率和生产率都比较低；④需要消耗盐、碱等介质；⑤劳动条件差，对环境污染严重。

电热浴炉按加热方式不同可分为外热式浴炉、管状加热元件加热的坩埚浴炉以及用电极直接通电加热的电极盐浴炉，如图所示，其中以电极盐浴炉应用最为普遍。



电热浴炉结构

(a) 外热式浴炉；(b) 管状加热元件加热的坩埚浴炉；
(c) 插入式电极盐浴炉；(d) 埋入式电极盐浴炉
1—金属坩埚；2—加热元件；3—炉衬；4—管状加热元件；
5—耐火材料浴槽；6—电极

电热浴炉按液体介质不同可分为盐浴炉、碱浴炉、油浴炉以及金属浴炉等，浴炉的工作温度取决于所用液体介质的成分。随着控制气氛电阻炉和真空电阻炉的发展，电热浴炉正逐渐被取代。

盐浴炉　以金属盐作为浴剂的电热浴炉。盐浴炉按加热方式分为电极盐浴炉和加热元件加热盐浴炉。

(1) 电极盐浴炉。采用电极加热，属于内热式浴炉，是以熔盐本身为电阻，电流经电极通过熔盐产生电阻热。它由炉壳、炉衬、浴槽、电极及盐炉变压器组成。浴槽用耐火材料（耐火砖、耐火混凝土等）砌筑。电极通常用碳钢制成，也有用不锈钢的。电极盐浴炉可分为低温炉、中温炉和高温炉3种。电极盐浴炉按电极在浴槽内布置的方式不同，可分为插入式电极盐浴炉和埋入式电极盐浴炉。电极盐浴炉都需配用盐浴炉变压器进行降压，其二次电压：用于插入式电极盐浴炉的为5.5～17.5V，用于埋入式电极盐浴炉的为11～35V。一般盐浴炉变压器上配有手动转换开关，分7～8挡进行分级调压。也有用油浸式带电抗器盐浴炉变压器、磁性无级调压器以及晶闸管无级调压装置的。三相供电的电极盐浴炉推荐采用T形接线三相变压器，用来把三相电源转变成两相电源，以提高炉温的均匀性和减少电极消耗，但电极引出结构复杂。

(2) 加热元件加热盐浴炉。主要由炉壳、炉衬、浴槽和加热元件组成，分低温炉和中温炉两种。低温炉的工作温度一般不超过550℃，浴槽多用低碳钢板焊接而成，也有用不锈钢板制作的。液体介质多是硝酸盐或亚硝酸盐（如55% KNO_3＋45% $NaNO_3$），主要用于合金钢的等温和分级淬火、回火以及铝合金的热处理等。使用硝盐炉时，必须有防爆等安全措施。中温炉的工作温度范围在850℃以内，其特点是必须用金属坩埚。因金属坩埚在高温下寿命较短，已逐渐被内热式盐浴炉取代。

碱浴炉　以碱性化合物作为浴剂的电热浴炉。工作温度不超过550℃，浴槽用钢板焊接而成，用加热元件在外部加热或用管状加热元件在内部加热，常用的浴剂有100% KOH、100% NaOH或两者的混合物加10%左右的水，主要用于碳钢与合金零件的回火、等温淬火或分级淬火。

油浴炉　用油（主要是矿物油）作为浴剂的电热浴炉。浴槽用钢板焊接而成，通常用管状加热元件在浴槽内部加热，工作温度不超过300℃，浴剂有HG-65H合成汽缸油、38号汽缸油等，主要用于合金钢的分级淬火、回火等。由于油的闪点低，易被氧化生成酸性渣，影响淬火工件的硬度和颜色。

金属浴炉　以低熔点金属作为浴剂的电热浴炉。浴槽用钢板焊接而成，一般用加热元件在浴槽外部加热，工作温度不超过600℃，浴剂主要为Pb和Sn以及它们的混合物。该炉主要用于合金钢的等温淬火。由于铅蒸气有较大的毒性，影响人体健康并污染环境，已很少使用。

dianre zhuangzhi

电热装置　(electro-heat installation)　由电热设备及其在操作和使用中所必需的电气和机械附属设备所组成的成套装置。电热设备是电热装置的主体，在其内通过一种或多种不同的电加热方式把电能转换成热能并加热炉料或进一步完成其他预定的工艺过程。电热设备大多以炉体的形式出现，由耐火和隔热材料构成炉室或炉膛以盛放炉料或工件和减少热损失。电热装置的机、电附属设备主要包括：①供电主电路，包括进线端开关和保护装置，电炉变压器、整流变压器或调压器，各种半导体变流器和大电流线路（短网）等；②机械动作机构以及炉料或工件传送设备；③液压、气动和水冷系统；④真空系统和（或）控制气氛发生器（适用于真空炉和控制气氛炉）；⑤控制和测量系统；⑥其他辅助设备，如淬火槽、清洗机、排烟除尘设备等。

电热装置是国民经济各工业部门的重要工艺装备，也广泛用于日常生活中。

安全和节电是电热装置设计和使用中的两个最重要的方面。

电热装置的安全　涉及电热装置及其辅助设备在正常运行、非正常运行和电热装置发生故障时能确保工作人员的人身安全，以免遭由电和非电因素引起的某些危险；也涉及确保装置自身的安全运行和避免对其他设备和周围环境造成不利影响。

安全隐危　电热装置的安全有别于一般机电产品，涉及机、电、环保等诸多方面，主要危险有：①作为热加工设备，工作温度高、热容量大，如工作温度可达1000～3000℃，熔炼炉的容量可达几百吨，熔炼炉的漏炉、冷却水管的烧穿或破裂以及大量水与高温熔融炉料的接触引起的爆炸都将造成重大人员伤亡和整个厂房的严重损坏；②工作电压高、配置功率大，工作电压可达几千伏甚至数万伏（如电

子束加热），单台炼钢电弧炉的功率可达几百兆瓦，易发生人身和电气事故；③控制气氛炉和氢气炉等炉中所使用的以及物料加热过程中所产生的可燃可爆气体，处理不当极易发生爆炸；④某些装置涉及有毒烟气排放、高频电磁场、光辐射和X射线等。因此，装备电热装置的冶炼车间、热处理车间和铸锻车间是危险性较高的部门，随着电热装置不断向大容量、高功率、高电压发展以及控制气氛炉的广泛应用，其危险的严重性也在不断增加。

安全标准　工业电热装置必须符合GB 5959《电热装置的安全》系列标准的要求。其主要内容涉及：①电热设备及其炉料传输和各种机械动作设备以及液压、气动、水冷、真空和控制气体发生等系统；②配套电气设备、静电荷—杂散场—电场和/或磁场、电磁作用的影响（包括电磁干扰、谐波电流、电压波动和闪变、电磁场的抗扰性等）、电离辐射等；③隔离和开合；④与电网的连接和内部连接；⑤触电的防护；⑥过电流保护；⑦等电位连接；⑧控制电路和控制功能；⑨热影响的防护；⑩防火和防爆；⑪铭牌、标记和技术文件；⑫电热装置的检查、试运行、使用和维护。

电热装置的节电　中国工业电热装置的用电量约占工业总用电量的20%，因此，其节电意义重大。电热装置的节电技术有合理选择电加热方式和炉型、减少散热损失、提高电热装置的电效率、改革工艺流程、采用计算机过程控制、余热的回收和利用以及集中生产或组织专业化生产。

合理选择电加热方式和炉型　根据炉料或工件情况、工艺要求、产量等合理选择电加热方式和炉型是从根本上实现节电的保证。（见电加热）

减少散热损失　减少散热损失可提高电热设备的热效率，措施有：①采用高功率配置，必要时添加辅助燃料能源，以缩短通电时间；②采用隔热性能好、蓄热量小的轻质耐火和保温材料，如陶瓷纤维、泡沫耐火和保温砖以及纳米孔硅质隔热材料等，采用低密纤维/耐火泥喷涂工艺用于构筑和修补炉衬；③提高电炉的装炉量，特别是熔炼炉的容量。

提高电热装置的电效率　减少供电设备和供电线路的电损耗可提高电热装置的电效率，如提高工作电压，采用先进节电的半导体电源和配套元器件，改进感应器和短网的设计，对铝、铜锭采用超导体直流感应加热等。

改革工艺流程　发展连续作业自动化生产线是节电潜力最大的方式，如钢材制品采用电弧炉—钢包精炼炉—连铸和连轧流程；用一套电压型变频电源向多台中频感应熔炼炉同时供电的作业方式，当一台炉熔炼时，其余炉子分别进行保温、浇注或装料；对大型齿轮由电阻炉整体渗碳淬火改为逐齿局部感应淬火等。

采用计算机过程控制　可缩短加热和熔炼时间，提高产品质量和生产率，节约电能。

余热的回收和利用　利用外排高温烟气预热炉料，对冷却水热量直接利用或采用热泵技术进行回收。

集中生产或组织专业化生产　为满量生产、节约用电，可集中工件开炉或设立热处理中心和铸锻造中心。

dianshi jieshouji

电视接收机

（television receiver；TV set）　将有线、卫星、地面、网络等不同传输方式发送的电视信号还原并输出至显示屏及扬声器，从而实现图像重现和声音重放的设备，简称电视机。电视是传送静止或活动影像的电子技术，简称TV。电视发射台用摄像管把图像的光信号变成电信号，再将信号放大、加工后送至电视图像发射机，在发射机内经过调制、放大等一系列加工，最后经电视发射天线以高频电磁波的形式发射出去。伴音是用话筒将声信号变成电信号，通过伴音发射机与图像用同一副天线发射。电视接收机外观见图。



电视接收机

沿革与发展　1884年，德国人P.G.尼普科夫（P.G. Nipkow）发明螺盘旋转扫描器，实现最原始的电视传输和显示。第一台电视机面世于1924年，由英国人约翰·贝尔德发明。1928年，美国的RCA电视台率先播出第一套电视片《Felix The Cat》，从此，人类步入了电视时代。1930年，电视图像和声音实现同时播放。20世纪50年代初期，黑白电视机逐渐推广。美国在1953年采用了NTSC（正交制）兼容制彩色电视制式，联邦德国、法国相继于1963、1966年确定了PAL（帕尔制）与SECAM（塞康制）彩色电视制式，从而形成3种彩色电视制式并为世界各国所采用。1976年，数字式可编程序的彩色电视机问世。1979年，世界上第一个有线电视在伦敦开通。80年代，电视机开始高清晰度大屏幕化，90年代开始数字电视机的开发，继而有了等离子、液晶电视的快速发展并逐渐成为市场主流。

中国的第一台黑白电视机诞生于1958年，1971年中国试制成功采用PAL制式的彩色电视机。1973年，中国开始试播彩色电视。1974年，中国有线电视诞生。1987年，中国成为世界最大的电视机生产国。进入20世纪90年代后期，中国的彩电业无论是生产技术、产销量、企业管理等都已全面进入成熟期，电视机成为对居民生活最具影响力的产品之一。1998年，中国生产出数字电视机。伴随着电视制作和传输技术的数字化，电视机将向智能化、交互式、超高清等方面发展，特别是与电脑的结合，将使其更加“聪明”，具有更多的功能，从而突破电视的传统含义。

未来电视机的发展主要体现在智能化、交互式、超高清等方面。①智能电视机具有全开放式平台，搭载了操作系统，用户在欣赏普通电视内容的同时，可自行安装和卸载各类应用软件，持续对功能进行扩充和升级。智能电视能够不断给用户带来丰富的个性化体验。②随着电视机功能的演进，越来越多的电视机支持人们的在线互动与交互，实现电视功能的无限拓展。③1920×1080分辨率的电视机越来越普及，同时4k（分辨率3840×2160）、8k（分辨率7680×4320）等超高清显示也将得到逐步推广。

分类　电视机的分类方法有多种，按色彩可分为黑白电视机和彩色电视机；按技术原理可分为模拟电视机和数字电视；按信号传输方式可分为有线电视、卫星电视、地面电视和网络电视等；按成像原理可分为阴极射线管电视机（CRT）、液晶电视机（LCD）、等离子电视机（PDP）、数字

光处理电视机（DLP）、有机发光二极管电视机（OLED）等。按观看效果可分为2D电视机和3D电视机。

性能指标　电视机的性能指标主要有接收性能指标和显示性能指标。

接收性能指标主要有：①灵敏度。电视机可能正常工作的最小输入信号电平，表征电视机接收信号的最小门限。②载噪比。用来表示载波与载波噪声关系的标准测量尺度，表征电视机抵抗噪声的能力。③抑制邻道干扰能力。用于测量电视机能否在特定频道上抵抗邻频道信号的干扰。

显示性能指标主要有：①亮度。画面的明亮程度，单位为cd/m^2。②对比度。对一幅图像中明暗区域最亮的白和最暗的黑之间不同亮度层级的测量，差异范围越大则对比度越大，反之亦然。③色域覆盖率。电视机还原色彩的能力，指电视机屏幕可以显示出来的色域空间大小。

选购要求　应从画质、声音、频道、倍频、能效、用途等方面选购。①画质。可选择图像对比度高、画面层次分明、色彩鲜艳的产品，但不同的电视机观看效果因人而异，可以选择通过认证的产品。②声音。消费者可通过主观听觉感受评价声音效果，如低频响亮为声音丰满，高频响亮为声音明亮等。电视机支持Dolby AC-3、MPEG-1、DTS等标准会具有更好的体验效果。③倍频。一般电视机每秒钟播出50幅图像，在这样的速度下肉眼看起来有闪烁感，时间久了眼睛会疲劳。100、200Hz甚至400Hz数码彩色电视机通过数字信号处理，在一秒钟内播出2倍、4倍甚至8倍数量的图像，从而使图像闪烁程度大大降低，画面清晰、稳定、流畅，即使长时间观看，也不会觉得眼睛疲劳。④能效。能效等级最高的为一级，能效指数越高越节能（见能效标识）。⑤用途。如果需要观看电脑信号或者播放器信号，需要电视机具备VGA接口或者HDMI接口，各种扩展功能的有线或者无线接口使电视机更具扩展性。

dianti diankong xitong

电梯电控系统　(electric drive control system for elevator)　用以实现电梯升降运动的电力拖动和控制等电路组合的整体。电梯作为垂直运输客货的交通工具，应满足高可靠性、舒适性、高效率等要求。

分类与组成　按拖动电动机分，有交流电梯、直流电梯；按运行速度分，有低速梯（1m/s以下），快（中）速梯（1～1.75m/s），高速梯（2～4m/s），超高速梯（5m/s以上）。一般低速梯用于10层以下建筑，中速梯用于20层以下建筑，高速梯用于20层以上建筑，超高速梯用于超高层建筑。

电梯的主要组成部分包括：曳引部分（由曳引电动机和曳引钢丝绳组成）、引导部分（由导轨和导轨架组成）、轿厢和厅门、对重装置（由置于对重架中的几十块铸铁构成，其质量为轿厢自重加0.4～0.5倍电梯额定载重量，以平衡轿厢负荷）、补偿装置（当提升高度超过35m时，为抵消钢丝绳和控制电缆自重对电动机负载的影响所加的补偿链）和电控系统（由选层器、传动与控制柜、轿厢操纵盘、呼梯按钮和厅站指示器等组成）。

基本要求　电梯电控系统应当实现安全性、合理速度变化、准确停靠等基本要求。

(1) 安全性。电控系统设置了多重安全措施。电气方面有电磁制动器，端站多级强迫缓速开关，极限开关，急停按钮，关门安全开关，厅门开关及磁场欠流，电动机过电流、过热、超速，门区低速等保护安全措施。此外还有机械联锁安全触点，如安全窗、选层器、钢带轮、限速器、胀绳轮、安全钳等。当机械设备处于非正常状态时，触点动作使电梯立即停止运行，确保乘客的人身安全。

(2) 合理速度变化。为保证乘客有良好的舒适感，一般规定电梯的加速度为$0.8～1.5m/s^2$，加加速度为$0.8～1.2m/s^3$。为使乘客在起动、制动等换速过程中无失重或超重感觉，可采用如图1(a)所示的速度给定曲线。

(3) 准确停靠。为了准确停靠，要求系统能准确发出减速信号。以前采用的机械选层器和井道内设置减速开关的方法，均难以满足要求。采用较多的有数字量方式和模拟量方式两种。①数字量方式。用与轿厢移动相关的光电开关或电磁脉冲发生器，将距离转换为脉冲型数字量，通过微型计算机计算后发出准确的减速信号。②模拟量方式。通过运算放大器将测速发电机的速度电压值积分得到已运行距离，然后经函数转换器、比较器发出减速信号。由于给定曲线、负载变化等各种因素的影响，难以实现速度平滑降到轿厢正好停于楼层平面处，为此必须设置平层校正环节补偿这些影响，保证平层精度。这是电梯控制系统的特殊要求。简单的方法是使速度给定曲线有一级爬行段或再加一级平快段来实现，如图1(b)所示。其缺点是效率低、舒适感差、平层精度低。较好的办法是按距离直接停靠原则，即在距停靠楼层水平200mm和100mm处发出校正信号，系统将此时的实际速度与设计规定的给定速度做比较，根据差值的极性和大小改变给定曲线的斜率，以保证轿厢无爬行直接停靠于楼层平面，达到舒适感、效率和平层精度均最好。

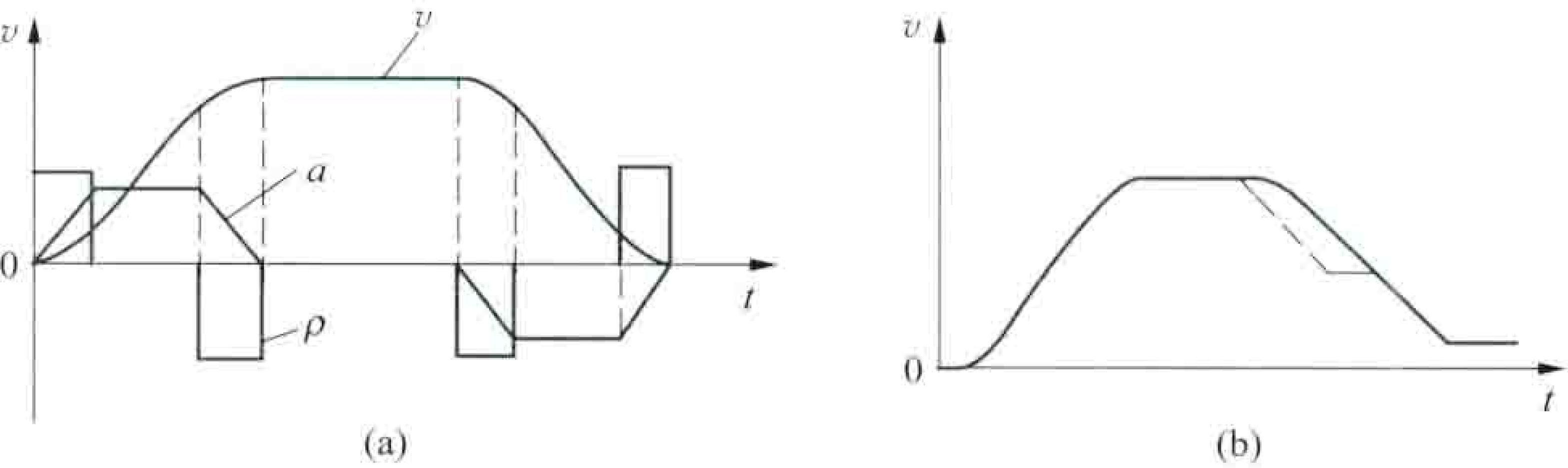


图1　电梯速度给定曲线

(a) 理想速度给定曲线；(b) 实际速度给定曲线

主传动系统　常用电梯主传动系统供电方式、曳引电动机、梯速、节能性能、调速性能及评价见下表。

变频变压电源系统与交流调压系统相比，可节能50%，平均功率因数由65%提高到90%以上，电源容量减少50%以上，且乘坐舒适感好。

变频变压电源系统与晶闸管供电系统在功率因数和能耗上的性能比较见图2。变频变压电源可减少电源容量20%，

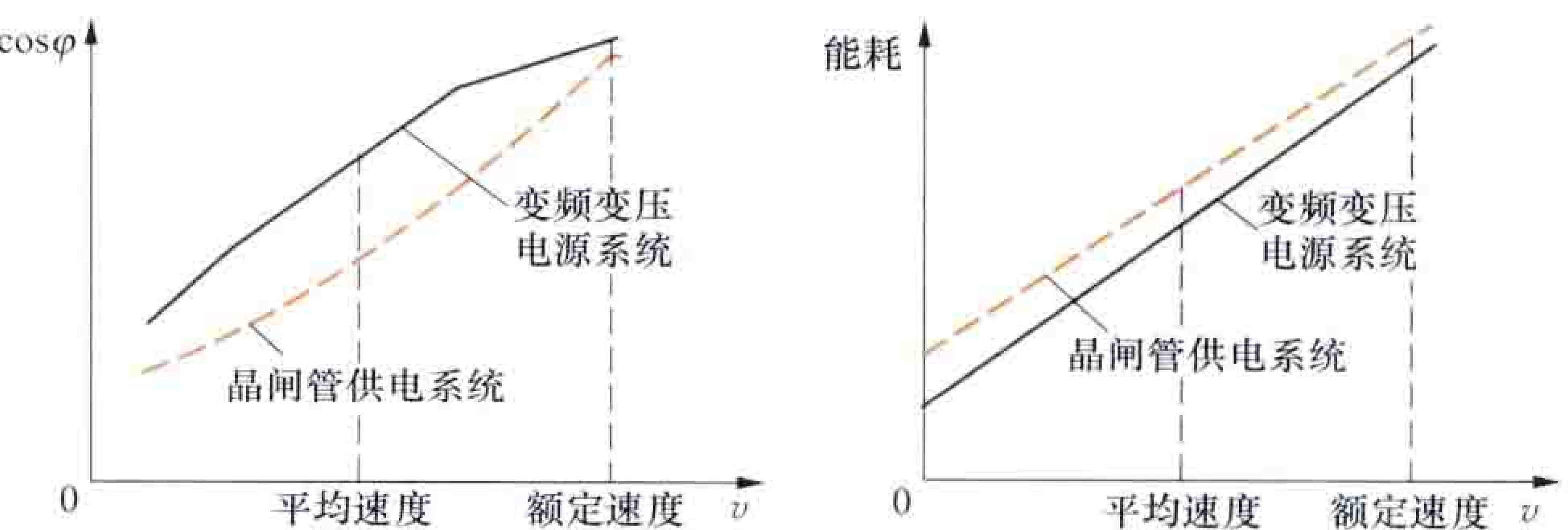


图2　变频变压电源系统与晶闸管供电系统性能比较

常用电梯主传动系统

系统名称	供电方式	曳引电动机	梯速(m/s)	节能性能	调速性能	评　价
交流单速系统	接触器三相交流直接供电	交流电动机	<0.75		差	适用货梯或简易客梯
交流双速系统	单绕组变极或双绕组供电	单/双绕组交流电动机	<1.0		差	适用于低档客货梯
交流调压系统	定子电压变频器交流调压供电	笼型感应电动机	1.0～2.0	中	中	适用于中高层客货梯，应用广泛，随着电力电子技术的发展，已逐步被变频变压电源系统取代
变频变压电源系统	定子侧变频器调压调频	笼型感应电动机或永磁同步电机	>2.0	高	优	大部分电梯都采用这种方式
晶闸管励磁系统	交流电动机-直流发电机供电、发电机晶闸管调压励磁	直流电动机	>2.0	低	优	高速梯仍有应用，但已基本被淘汰（占地面积大，噪声高，耗能高，但性能优良可靠）
晶闸管供电系统	电枢晶闸管三相桥式反并联系统供电	直流电动机	>2.0	高	优	在高速梯采用，使用中应注意对电网的污染问题，但因采用直流电动机，因此也基本被淘汰

能耗减少5%～10%，对电网的污染也降低了。随着电力电子技术的发展，采用变频变压调速的交流传动系统和全数字化控制已经逐步取代了传统的晶闸管供电系统和模拟控制系统。

控制方式　图3所示为几种典型的电梯电控系统方框图。系统中的各种控制电路部件，如给定电路、速度调节器等可以用模拟电路构成，也可以采用微型计算机来实现。电梯电控系统的任务有两项：一是多梯系统中调配电梯发车；二是完成单梯本身的功能，包括厅内召唤和轿厢内指令的登记、应答、消号、定向、开关门控制，电源的通断，控制方式选择，起制动及平层、停车控制，安全联锁，层楼显示等基本功能，以及消防、紧急供电等特殊功能。

电梯电控系统根据梯数一般分为单梯、双梯并联及梯群控制3种方式。调配的基本原则是提高运输效率，降低能耗，缩短候梯时间。①单梯控制。单梯通常采用向下集选原则，即以底层为基站，顺向截车，反向最远层召唤自动反向。②双梯并联控制。双梯并联亦采用向下集选原则。为提高效率可采用分区控制原则，即根据两台梯的轿厢位置、运行方向，分配各梯的厅内召唤应答区域，避免两梯一起运行应答同一召唤。在一台梯繁忙，另一台空闲时间，按照延时时间或繁忙区的召唤应答数，使空闲梯发车进入繁忙梯的工作区协助接客。③梯群控制。3台以上（8台以下）一般采用梯群控制方式，根据客流情况通过交通分析分配各梯的外部召唤应答区域。交通分析的基本参数包括：大楼客流负载情况，一般可分为正常、空闲（夜间）、上行高峰、下行高峰、层楼高峰、区域高峰6种情况；各梯的运行方向；各梯的负载情况，可分为空载、轻载、满载；各梯的相对位置；各梯应答区域

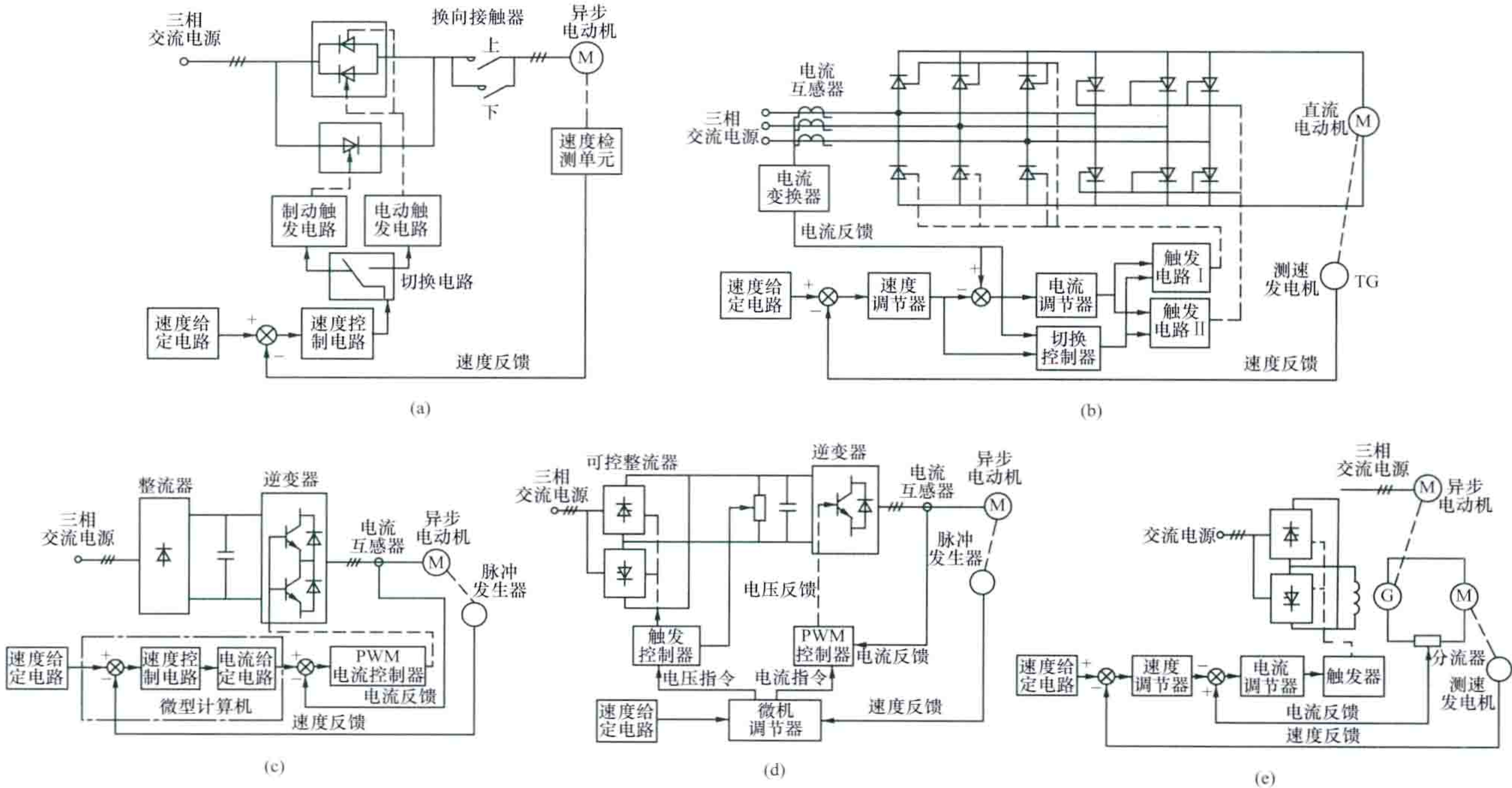


图3　典型电梯电控系统框图

(a) 交流调速系统；(b) 晶闸管供电系统；(c) 快速变频变压电源系统；(d) 高速变频变压电源系统；(e) 晶闸管励磁系统

内的召唤数；各梯的工作状态，如检修、自动、专用、备用等；特殊情况，如消防、紧急供电等。系统依据前述调配的基本原则调配各梯运行。

控制系统可由继电器或逻辑单元、微型计算机或PC机构成。采用继电器的控制系统已被淘汰。逻辑单元系统采用分立元件和中小规模集成电路组成，在20世纪70年代曾采用过。70年代末起国际上各大电梯公司均采用微型计算机控制。图4所示为梯群微型计算机控制系统框图。微型计算机具有体积小、维护工作量小、耗能少、功能强、灵活、通用性强等优点，对维修人员的技术水平要求也较高。一般每台电梯设置一个微型计算机，调配功能由上级计算机或某台梯的微型机兼营。

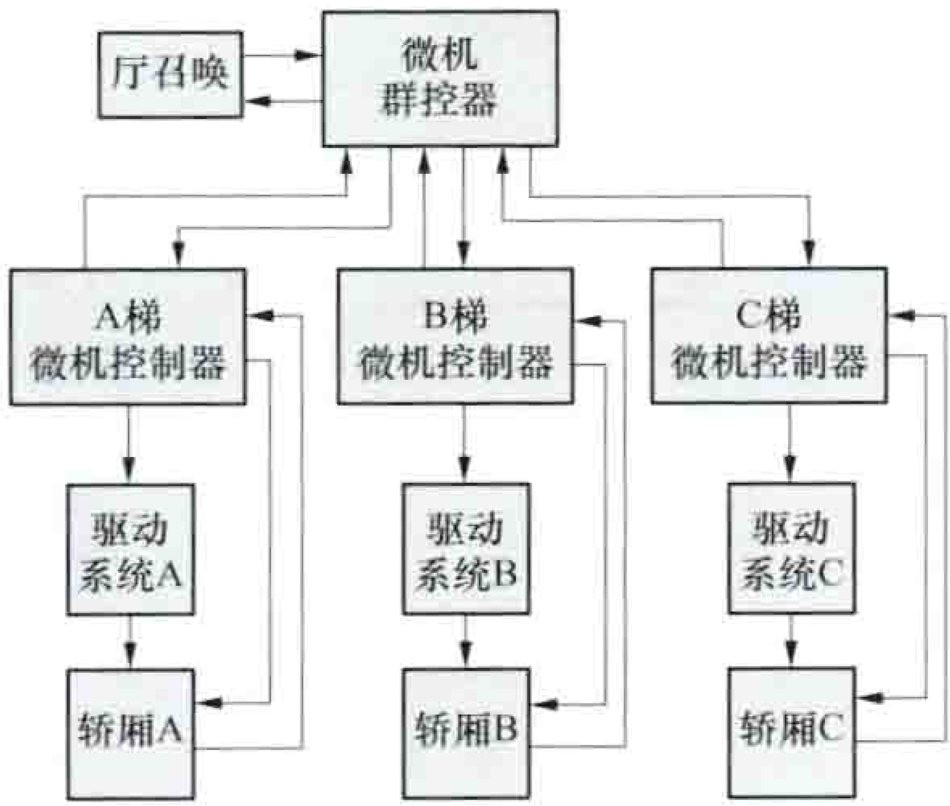


图4 梯群微型计算机控制系统框图

dianya bodong

电压波动 (voltage fluctuation)

见电压波动和闪变。

dianya bodong he shanbian

电压波动和闪变 (voltage fluctuation and flicker)

电压（方均根值）一系列的变动或连续的改变以及由电压波动引起的照明不稳定的现象。在某一段时间内，电压急剧变化而偏离额定值的现象，称为电压波动。周期性电压急剧变化导致电光源的光通量急剧波动而引起灯闪，造成人眼视觉主观感觉不舒适的现象，称为闪变。电压波动值 d 为电压调幅波中相邻两个极值 U_{max} 和 U_{min} 方均根之差 ΔU，常以 ΔU 占额定电压的百分数表示，即

$$d=\frac{U_{max}-U_{min}}{U_N}\times 100\%$$

式中 U_N 为额定电压，V；U_{max}、U_{min} 分别为某段时间内电压（方均根值）波动的最大值和最小值，V。

电压波动是大型用电设备开停或负载急剧变化引起的冲击负荷造成的。大型电动机开停及加减载、轧钢机轧钢、起重机提升、炼钢电弧炉熔化期工作短路、弧焊机引弧、电力机车运行等都有冲击负荷产生。电压波动是否会引起闪变，主要取决于电压波动的频度、波动量和电光源类型以及工作场所对照度的要求。偶然产生的电压波动，即使是较大的电压波动，如大容量电动机直接起动引起的电压波动，对人眼视觉影响也是不大的，但当电压波动的频率在8～12Hz时，即使电压波动只有额定电压的0.3%，也会引起白炽灯照明的闪变且足以使人感到不舒适。

影响　由于一般的用电设备对电压波动的敏感度远低于白炽灯，通常选择人对白炽灯照度波动的主观视感（即闪变）来衡量和评价电压波动的危害程度。主要表现在：①照明灯光闪烁引起人的视觉不适和疲劳，进而影响视力和工效。②电视机画面亮度变化、图像垂直和水平幅度摆动，刺激人的眼睛和大脑。③电动机转速不均匀，不仅危害设备正常运行及寿命，而且影响产品质量。④电子仪器、电子计算机、自动控制设备等不能正常工作。⑤对电压波动较敏感的工艺或实验不能正常进行。

标准　为控制电压波动与闪变产生的影响，世界各国普遍都对此进行研究并制定了相应的标准。

中国从保证供用电安全出发，为防止一些用电设备引起的电压波动造成的危害，在GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》中，对电动机全压起动的电压允许波动做出规定；在GB 50056《电热设备电力装置设计规范》中，对三相电弧炉工作短路引起的供电母线电压允许波动值也做出了规定。GB/T 12326—2008《电能质量　电压波动和闪变》，规定了电压波动和闪变的限值、计算和评估方法：①任何一个波动负荷用户在电力系统公共连接点产生的电压变动 d，其限值与电压变动频度 r、电压等级有关，见表1。②在电力系统公共连接点，衡量闪变的单位是短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt}。P_{st} 是10min内闪变强度的一个统计量值，而 P_{lt} 是由 P_{st} 推算出来的，反映长时间（2h）闪变强度的量值。P_{st} 和 P_{lt} 均由符合IEC 61000-4-15《电磁兼容（EMC）第4-15部分：实验和测量方法 闪烁计功能和设计规范》标准的仪器量测获得。中国国家标准推荐的 P_{lt} 值见表2。部分国家电压波动和闪变标准见表3。

表1　电压波动限值

r（次/h）	d（%）	
	LV、MV	HV
$r\leqslant 1$	4	3
$1<r\leqslant 10$	3	2.5
$10<r\leqslant 100$	2	1.5
$100<r\leqslant 1000$	1.25	1

注：系统标称电压 U_N 等级按以下划分：低压（LV），$U_N\leqslant 1$kV；中压（MV），$1\text{kV}<U_N\leqslant 35$kV；高压（HV），$35\text{kV}<U_N\leqslant 220$kV。

表2　闪变限值 P_{lt}

电压等级	≤110kV	>110kV
P_{lt}	1	0.8

表3　部分国家的电压波动和闪变标准

电压波动的形式	国别	限度	备注
瞬时值10Hz等值	德国	0.4%～0.5%	3～8Hz
	澳大利亚	1%	110kV 0.75%
	挪威	0.5%	
	法国	0.3%	
	意大利	0.3%	
	日本	最大0.45% 平均0.32%	
		最大0.58% 平均0.45%	

续表

电压波动的形式	国　别	限　度	备　注
瞬时值10Hz等值	美　国	0.5%	
	巴　西	0.5%	
	阿根廷	0.5%	
	伊　朗	0.5%	
闪变	英　国	132kV及以下 0.25%	
		275kV及以上 0.20%	
电弧炉额定容量	瑞　士	单台为1.2%～1.6%；2台为2%～2.7%；3台及以上为2.8%～3.7%	
系统稳态短路容量			
短路电压降（单台炉、多台炉需换算为等值电炉）	英　国	2%	132kV以上为1.6%
	瑞　典	2.5%	2%～2.5%为可疑
	荷　兰	1.75%	2台为2%
	日　本	2%	
	巴　西	2%	
	伊　朗	2%	

改善措施　抑制电压波动和闪变的主要措施有：①增加供电系统容量，提高供电电压等级；②对大容量冲击性负荷用户，接入较高等级的供电系统且采用专用变压器和专线供电；③合理选择变压器的分接头，在新建变电站或用户新增配电变压器时，尽可能采用有载调压变压器；④采用快速响应的静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）和动态电压调节器（DVR）等对负荷波动进行实时动态补偿；⑤采用电抗值最小的高低压配电线路方案；⑥线路出口加装限流电抗器，减小电压的波及范围；⑦配电变压器并列运行；⑧改进生产操作工艺，如电动机降压起动、电弧炉电极升降等的自动调节，多台电弧炉炼钢时错开熔化期和采用合理的炉料配比等。

dianyaliguo

电压力锅　(electric pressure cooker)　一种额定蒸煮压力在4～140kPa范围内的电烹饪家用电器。按照压力控制原理，电压力锅（见图1）有压控型、温控型、压控和温控复合型3种。按照压力安全防护结构不同，有刚性结构和弹性结构两种。按照泄压结构不同，有动缝式泄压和窄管式泄压两种。



图1　电压力锅

刚性结构电压力锅　在传统压力锅的基础上，加入电加热和电控功能的电烹饪器具。通常由锅体、锅盖、发热盘、限压阀等部分构成，如图2所示。其锅盖和锅体成刚性结合，其结合点是锅体锅盖上的凸牙，从而形成密闭承压空间。锅体、锅盖、凸牙的强度决定了压力锅的承压能力。通过窄管式排汽通道（排汽阀）排汽调节容器内压力，通过重锤式排汽阀或弹簧限压阀实现工作压力的控制。

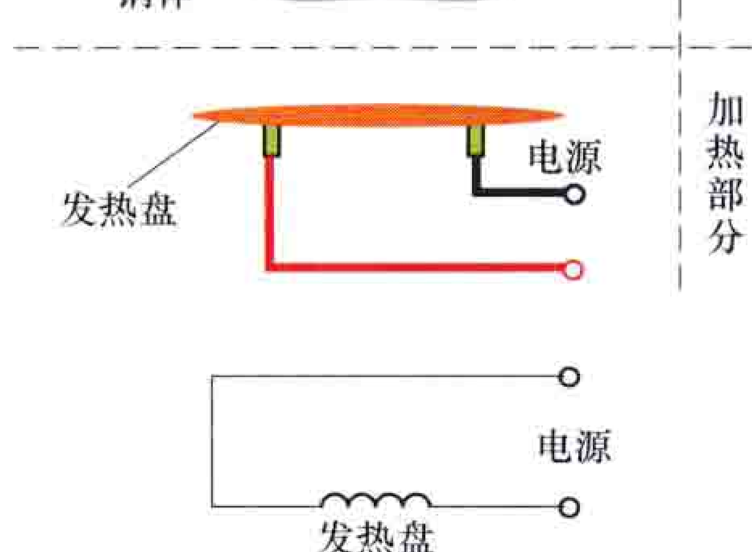


图2　刚性结构电压力锅结构示意图

弹性结构电压力锅　由锅体、锅盖、发热盘、压力开关、弹性部件等组成，如图3所示。锅体分内、外两层，外锅体与锅盖结合，内锅体与锅盖通过密封圈构成密闭承压空间。内锅体位于一弹性部件（弹性部件可以和电热盘等制作成一体）上，承压空间的密封是动态的，在内锅压力变化的作用下，弹性部件可以相对于外锅体（锅盖）产生位移，触发控制电路，从而切断或接通电源。当容器内压力异常升高时，内锅位移增加，内锅与锅盖之间出现缝隙，形成排汽泄压以保证安全。

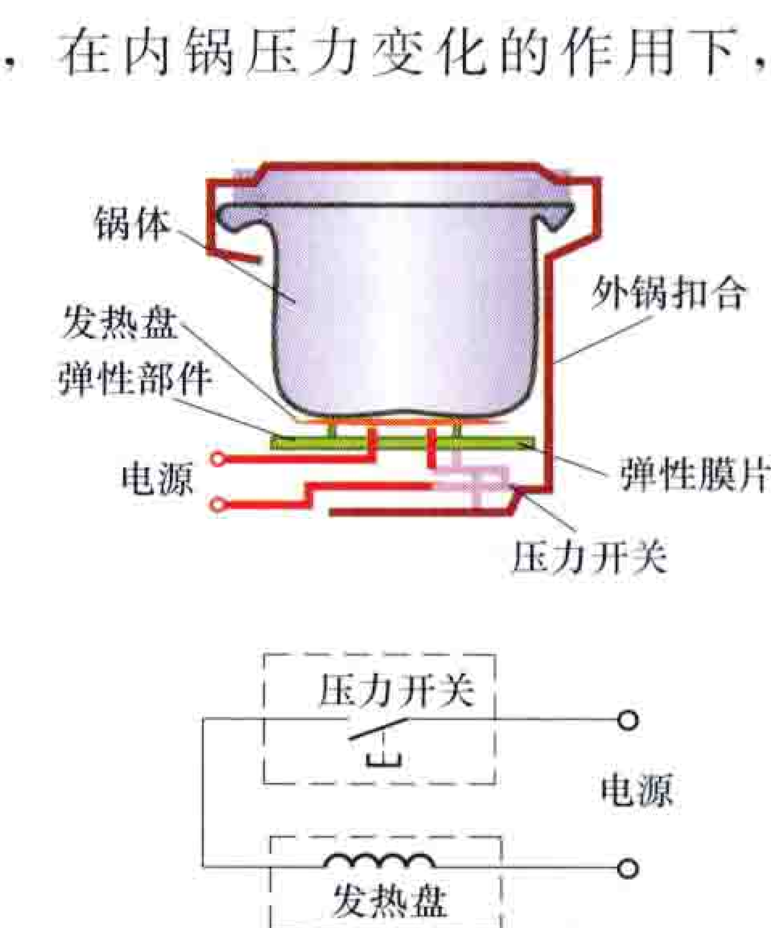


图3　弹性结构电压力锅结构示意图

弹性结构电压力锅改变了通过控制温度来控制压力的传统方法，对压力直接控制，用偏差小、响应快的机械式（压力）控制，弥补了偏差大、反应滞后的电子式（温度）控制的不足，实现了对压力（温度）的精准控制。

dianya zanjiang

电压暂降　(voltage dip；voltage sag)　供电电压有效值在短时间内突然下降又回升恢复的现象，也称为电压跌落。其中电压有效值快速降低到接近于零，然后又回升恢复的现象称为短时断电。在电网中这种现象的持续时间主要由熔断器、断路器和保护装置的动作时间决定，大多在10ms～1s之间。美国电气与电子工程师协会（IEEE）将电压暂降定义为电压有效值快速下降到额定值（U_N）的90%～10%，然后回升到正常值附近；国际电工委员会（IEC）则将电压暂降定义为下降到额定值的90%～1%，持续时间均规定为10ms～1min。IEEE和IEC对于“接近于零”的定义分别为电压低于10%U_N和1%U_N，其持续时间规定为小于3min。

对电压暂降（包括短时断电）的研究主要包括：电压暂降的产生原因、电压暂降的危害、电压暂降的特征量及其监测统计、暂降过程的仿真计算、暂降域研究、不平衡暂降的特性、暂降在不同电压等级之间的传递、暂降对供电可靠性的影响、电压暂降的抑制措施、暂降的敏感曲线和标准制定等。

产生原因　供电系统任意点上发生的电气短路是电压暂降的主要来源。短路导致电流的急剧升高，随之引起供电系统阻抗上大幅度的电压降落。保护装置将短路故障清除，使系统各点的电压立即恢复到接近于短路前的值。大负载的切换、空载变压器合闸的励磁涌流、电容器组的投切、大型电动机的起动等，都会产生与短路电流的效果类似的电压大幅度变化。

危害　电压暂降会引起变速驱动装置（ASD）跳闸，程序逻辑控制器（PLC）损坏，各种数字式自动控制装置误动，计算机系统失常、数据丢失，导致相关加工生产线（如石化、玻璃、纺织、造纸、塑料、半导体以及橡胶等）停顿，大型场所照明失电（如镝灯，灯灭后需冷却几分钟后才能启动）等。

电压暂降的特征量及其监测统计　电压暂降通常用下降幅值（或深度）、持续时间、相位跳变以及发生频次等特征量来描述。如图 1 所示，电压暂降的深度 d 定义为电压额定值（U_N）与电压下降的最小值之差 ΔU，以额定值的百分数表示。而暂降的持续时间 Δt 则定义为低于 90% U_N 至回升到 90%U_N 的时间。电压暂降常常伴随有电压相位的突变，称之为相位跳变。这种现象的出现，是因为系统的电抗与电阻的比值（即 X/R）和线路的电抗与电阻的比值不同，或不平衡暂降由高压系统向低压系统传播引起的。上述定义对矩形的电压暂降曲线来说是准确的；对非矩形的暂降曲线，即使暂降深度和持续时间相同，不同的暂降曲线引起的危害对某些用户也是不同的。因为不同用户对电压暂降的幅值、持续时间的敏感程度不同。有的用户对暂降幅值比较敏感，如某些精加工机械装置在深度为 10%持续 2～3 周波时就会跳闸；有的用户则对暂降持续时间比较敏感，如计算机可承受深度小于 40%的暂降，但持续时间不能超过 4 个周波。所以在描述暂降频次时应考虑用户的敏感程度。

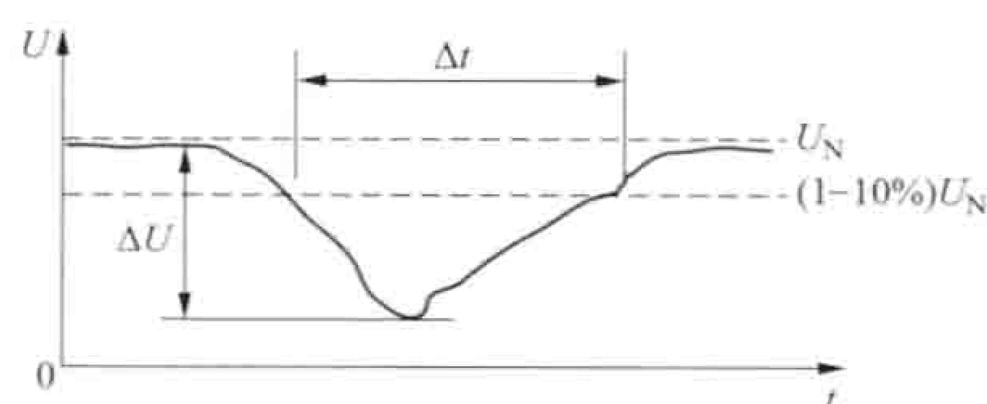


图 1　电压暂降示意图

由于电压暂降的发生是一个随机事件，电压暂降的监测和统计分析需要电力部门和用户的长期密切配合，即电力部门测量记录电压暂降发生的准确时间以及电压暂降的深度和持续时间，用户则记录设备异常运行的准确时间，从而确定各种设备对电压暂降的敏感度。这种监测可以为分析电压暂降的起因提供依据，并有助于减少事故次数，同时为用户及设备制造商提高设备的免疫能力积累资料。

暂降过程仿真　可仿真计算系统短路故障等引起的电压随时间的变化过程，得出不同类型电压暂降的特征参数、分析暂降发生的原因和暂降源定位等。大负荷投切、异步电动机起动等引起的电压暂降值较小，持续时间较长，一般不会带来较大的事故和损失。危害性较大的电压暂降主要是由系统短路故障引起的，其传播距离远、暂降幅值大。因此要建立相关的负荷模型（如电动机和整流器模型）和系统模型（如变压器和线路模型等），仿真各种故障类型、不同的故障地点、不同的电压等级引起的电压暂降以及电动机起动、空载变压器合闸等引起的电压暂降现象，量化分析它们之间的联系与区别，分析电压暂降的原因。

电压暂降过程仿真可在 EMTDC/PSCAD、Matlab/Simulink 等软件平台上进行。仿真建模的详细程度与可能引起暂降的原因有关。通常网络用戴维南等效模型；线路和电缆采用分布参数或集中参数模拟；变压器采用线性模型，必要时考虑其饱和特性；负荷采用恒定阻抗模型；保护装置考虑动作时延和重合闸时间等。

暂降域研究　暂降域是指电压暂降使相关敏感负荷不能正常工作的故障点所在区域。确定暂降域的分析方法有临界距离法和故障点法等。临界距离法通过确定母线电压降低到所设定的临界电压时故障点与所关心母线之间的距离得到该母线的临界域，若故障发生在此临界域内，则对敏感负荷有不良影响。故障点法先粗略分析各种可能发生的故障对敏感负荷产生的暂降影响，然后对各种故障类型进行仿真或短路计算，得到暂降幅值、相位跳变和持续时间等特征量，再据此准确地判断可能带给负荷不良影响的暂降域。临界距离法原理简单明确，但没有计及暂降持续时间对敏感负荷的影响。故障点法可考虑各种故障情况及各个特征量对暂降域的影响，但较复杂，计算量大。

不平衡暂降的特性　三相不对称电压暂降除应考虑三相对称暂降中的特征量外，还应考虑暂降类型、特征电压和持续时间。暂降类型基本分为 7 种，其电压暂降计算列于表 1。其中，由三相故障引起的为类型 A，单相故障引起的为类型 B，两相故障引起的是类型 C、D、E、F、G。A 型暂降的三相电压降低的幅值相同；B 型暂降只有一相电压幅值降低。A、B 类型易判别，而 C、D、E、F、G 类型容易混淆，因为两相故障时负荷所承受的暂降与其联结形式是星形还是三角形有关。

表 1　暂降的 7 种类型［k，残压（标幺值）］

类型	相量图（细线表示故障前；粗线表示发生故障）	故障类型	相　电　压
A	c a b	三相	$\underline{U}_a = kU$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}kU - j\frac{\sqrt{3}}{2}kU$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}kU + j\frac{\sqrt{3}}{2}U$
B	c a b	单相	$\underline{U}_a = kU$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}U - j\frac{\sqrt{3}}{2}U$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}U + j\frac{\sqrt{3}}{2}U$
C	c a b	相间	$\underline{U}_a = U$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}U - j\frac{\sqrt{3}}{2}kU$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}U + j\frac{\sqrt{3}}{2}kU$

续表

类型	相量图（细线表示故障前；粗线表示发生故障）	故障类型	相　电　压
D		相间	$\underline{U}_a = kU$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}kU - j\frac{\sqrt{3}}{2}U$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}kU + j\frac{\sqrt{3}}{2}U$
E		两相接地	$\underline{U}_a = U$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}kU - j\frac{\sqrt{3}}{2}kU$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}kU + j\frac{\sqrt{3}}{2}kU$
F		两相接地	$\underline{U}_a = kU$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{2}kU - j\frac{1}{\sqrt{12}}kU$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{2}kU + j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+k)U$
G		两相接地	$\underline{U}_a = \frac{1}{3}(2+k)U$ $\underline{U}_b = -\frac{1}{6}(2+k)U - j\frac{\sqrt{3}}{2}kU$ $\underline{U}_c = -\frac{1}{6}(2+k)U + j\frac{\sqrt{3}}{2}kU$

暂降在不同电压等级之间的传递　用户设备接入的电压等级一般低于经常发生短路故障的电压等级。因此，设备终端的电压不仅取决于公共连接点（PCC）处的电压，还取决于PCC与设备终端之间的变压器绕组联结方式（相位移）和负荷的接线方式。表2总结了不同暂降类型，在不同变压器绕组联结方式下向较低电压等级变换后的状况。

表2　电压暂降类型向较低电压等级的变换

变压器绕组联结方式	一次侧电压暂降类型						
	A	B	C	D	E	F	G
YNyn	A	B	C	D	E	F	G
Yy，Dd，Dz	A	D	C	D	G	F	G
Yd，Dy，Yz	A	C	D	C	F	G	F

三相负荷有星形（一般中性点不接地）和三角形联结两种，对于电网中不同故障感受到的电压暂降类型是不同的，见表3。

表3　故障类型、电压暂降类型与负荷联结关系

故障类型＼负荷联结方式	星形	三角形
三相故障	A	A
两相接地故障	E	F
相间故障	C	D
单相故障	B	C

暂降对供电可靠性的影响　传统供（配）电可靠性只以超过1min或5min的停电为依据，DL/T 836—2003《供电系统用户供电可靠性评价规程》明确规定自动重合闸重合成功，或备用电源自动投入成功，不视为对用户停电。但是单一以停电时间来衡量的供电可靠性指标，并没有体现电压暂降对用户及社会造成的危害，没有反映现代电力系统条件下电力敏感负荷受其影响的严重性。

表征电压暂降的特征量主要为有效值变化及电压暂降持续时间，因此衡量电压暂降的指标主要采用SARFI指数（system average RMS variation frequency index）。它有两种形式：一种是针对某一阈值电压 x 的统计指数 SARFI_x；另一种是针对某一设备的敏感曲线的统计指数［SARFI（curve）］。SARFI（curve）指数主要统计电压有效值低于相应的设备敏感曲线的概率。不同的敏感曲线对应不同的SARFI指数，如SARFI（SEMI）、SARFI（ITI）等。SARFI_x 指数主要统计电压有效值低于阈值电压 x 的概率，如

$$\mathrm{SARFI}_x = \frac{\sum N_i}{N_T}$$

式中 N_i 为对于第 i 次测量过程中，研究区域内电压有效值低于阈值电压 x 的用户数；N_T 为研究区域内的用户总数。

此外，实际应用中还有在 SARFI_x 基础上派生出来的 SIARFI_x、SMARFI_x 和 STARFI_x 等系数。

中国学者以概率统计理论为指导，提出了计及电压暂降（含短时中断）的供电可靠率修正指标 RS^*（reliability on service in total，RS），将电压暂降纳入到可靠性的定义中，体现了电压暂降对供电可靠性的影响。

电压暂降的抑制措施　一方面采取措施降低系统短路故障的发生率，以减少发生电压暂降的概率；另一方面在短路故障发生后，合理地控制短路电流的大小及持续时间，从而减少因电压暂降造成的损失。

在系统侧降低电压暂降危害的相关措施有：①提高继电保护的动作速度；②采用故障限流器，以降低故障电压；③合理配置线路中的自动重合闸和熔断器；④采用不同来源的双回路供电；⑤调整运行方式，修改馈线布局结构；⑥架空线入地、沿线树枝修剪、防雷接地保护的完善和管理等。

在用户侧减少电压暂降危害的方法可以从提高设备对电压暂降的承受力和在用户侧利用机械器件的转动惯性及大功率现代电力电子器件的快速投切等方面着手，包括：①对电动-发电机组，由于转子的转动惯量较大，在一定程度上可以克服瞬间电压降的影响；②采用电能储存装置，可以缓解电压暂降对负荷的影响；③采用不间断电源（UPS）；④动态电压恢复器（DVR）、固态切换开关（SSTS）、统一电能质量控制器（UPQC）和恒压变压器（CVT）等现代电力电子装置和设备。

电压暂降敏感曲线和标准制定　电压暂降的危害程度与设备的敏感程度密切相关，不同的设备对同一电压暂降的感受度是不同的，因此不同的设备制造商制定了不同的敏感曲线，如SEMI F47［Semiconductor Equipment Manufacturers International（半导体设备制造商国际组织）］、ITI（CBEMA）［Information Technology Industry（信息技术工业协会）］以及FIPS［Federal Information Processing Standards Publication（联邦信息处理标准出版物）］等。根据不同设备的敏感度曲线，可确定不同设备受电压暂降事件的影响程度。在分析电

压暂降的危害时，对于不同的设备或负荷，应当采用不同的敏感曲线。IEEE及一些大公司采用的有ITI（CBEMA）曲线、SEMI F47曲线等。图2即为ITI曲线图。

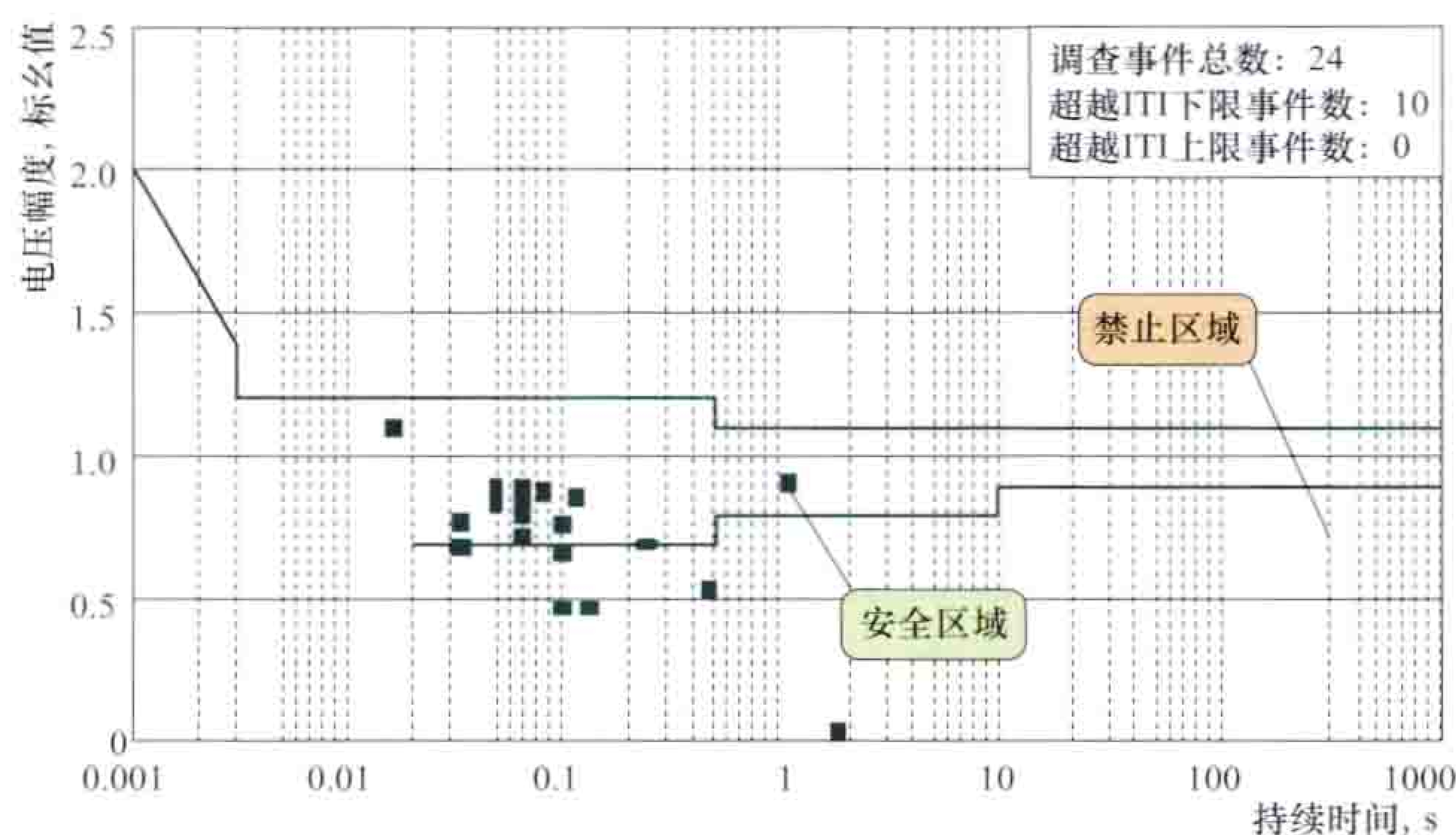


图2 ITI（CBEMA）曲线统计图

电压暂降标准制定要考虑：①电压暂降是一项重要的电能质量指标，涉及一批高新技术企业或用户的供电可靠性和技术经济效益；②电压暂降的发生往往带有随机性、偶发性（从时间、地点和故障性质看），其发生频度和电网结构、地理气象条件、运行维护水平等因素有关，其影响大小和用电负荷性质和工况有关，因此很难提出一个统一的控制指标，各电网只有在长期监测、统计的基础上，根据具体用户提出协议控制指标；③电压暂降不仅取决于公用电网，也和用户内部电网有关，还和用电负荷性质（承受电压暂降的能力以及对电网产生的冲击影响）有关，因此减小暂降的危害需要供用电双方共同努力。中国对于电压暂降的研究已有十年多历史，相关的标准已在制定中。

参考书目

Bollen M H J. Understanding Power Quality Problems, Voltage Sags an d Interruptions. New York: IEEE Press, 2000.

肖湘宁．电能质量分析与控制．北京：中国电力出版社，2004.

程浩忠，等．电能质量．清华大学出版社，2006.

dianyundou

电熨斗 （electric iron） 利用电加热熨烫衣物、花绣、针纺织品等的熨烫器具（见家用电器）。家用电熨斗的功率一般为100～1200W。服装行业使用的工业电熨斗采用吊瓶式喷汽电熨斗，功率一般为1000～1200W。电熨斗的底板一般用铸铁经电镀、电抛光，或用铝合金经喷涂聚四氟乙烯涂层制成。常用的加热元件有：①在云母骨架上绕电热丝构成；②管状加热元件；③PTC元件（正温度系数热敏电阻）；④薄膜加热元件。

1882年美国人H. W. 西利（H. W. Seely）获得第一个电熨斗专利。20世纪初，美国人E. 理查德森（Earl Richardson）发明的电熨斗投放市场受到欢迎。

电熨斗按熨烫方式分为平烫和挂烫两种。①平烫式电熨斗（见图1），熨烫时将衣物放平，利用电熨斗自身重力和使用者向下的压力将衣物熨平。②挂烫式电熨斗（见图2），通电后将水汽化成高温、高压水蒸气，并通过蒸汽导管和喷头将灼热水蒸气释放，使用中对准衣物褶皱处喷射，可实现平整、柔顺及除菌、除尘等功能。



图1 平烫式电熨斗

电熨斗按结构和功能一般分为普通型、调温型、蒸汽型、蒸汽喷雾型4类。



图2 挂烫式电熨斗

普通型电熨斗的结构简单，主要由底板、加热元件、罩壳、手柄等部分组成，是电熨斗中的最基本形式。它不能调节温度，已逐渐被淘汰。

调温型电熨斗可根据不同织物要求，控制熨烫温度。在普通型电熨斗上增加温度控制装置即成为调温型电熨斗。温度控制元件采用双金属片，利用调温旋钮改变双金属片上静、动触点之间的初始距离和压力，即可获得所需的熨烫温度，调节范围一般为60～250℃。

蒸汽型电熨斗具有调温和喷汽双重功能，代替了人工喷水。在调温型电熨斗的基础上增加蒸汽发生装置和蒸汽控制器，即构成蒸汽型电熨斗。

蒸汽喷雾型电熨斗具有调温、喷汽、喷雾多种功能。蒸汽喷雾型电熨斗的结构比蒸汽型电熨斗多了一个喷雾系统。其喷汽系统和蒸汽型电熨斗相同（见图3）。当底板温度高于100℃时，按下喷汽按钮，控水杆使滴水嘴开启，水即滴入汽化室内汽化，并从底板上的喷汽孔喷出；喷雾装置与产生蒸汽的装置是互相独立的，按下喷雾按钮，喷雾阀内活塞向下压，阀内的圆钢球将阀底部的孔紧紧封闭，阀内的水便通过活塞杆的导孔由喷雾嘴以雾状喷出，松开手后，喷雾按钮自然复位，由于阀的作用，储水室内的水将阀底部的圆钢球顶开，通过阀底孔进入阀内。

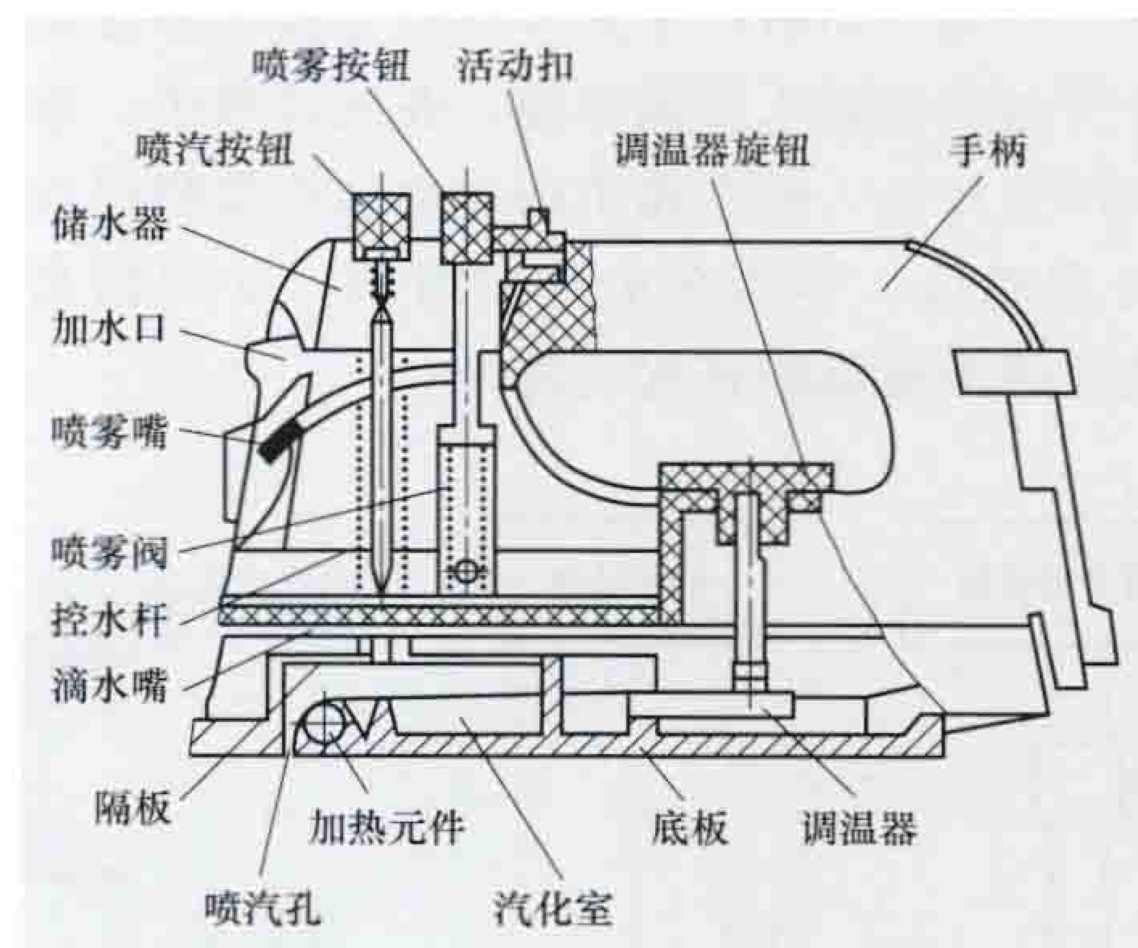


图3 蒸汽喷雾型电熨斗结构

dianzha chongronglu

电渣重熔炉 （electroslag remelting furnace） 利用电流通过高电阻熔渣产生的焦耳热对待重熔金属进行再熔炼或铸造的电阻炉，简称电渣炉。电渣重熔一般是在大气压力下进行的，根据需要，也可配置真空机组进行真空重熔精炼。

电渣重熔炉（见图1）的用途广泛，采用不同渣料可精炼各种合金结构钢、耐热钢、轴承钢、锻模钢、高温合金、精密合金、耐蚀合金、高强度青铜，以及其他铝、铜、钛、

银等有色金属的合金；采用不同形状的结晶器可以直接生产大直径钢锭、厚板坯、中空管坯、大型柴油机曲轴、轧辊、大型齿轮、高压容器、炮管等优质铸钢件。用于大型复杂铸件生产的电渣重熔炉又称电渣铸造炉。



图1　200t级电渣重熔炉（胡叔良　提供）

原理　如图2所示，自耗电极由被熔炼材料本身制成，其下端插在渣池中。电流经熔渣产生焦耳热使电极端部逐渐熔化。熔滴形成并穿过渣层进入金属熔池，在此过程中，熔滴与熔渣发生强烈冶金反应，使金属中的非金属夹杂物得以有效清除，金属得到精炼。熔滴在水冷铜坩埚（又叫结晶器）中汇集成熔池并逐渐凝固成铸锭或铸件。

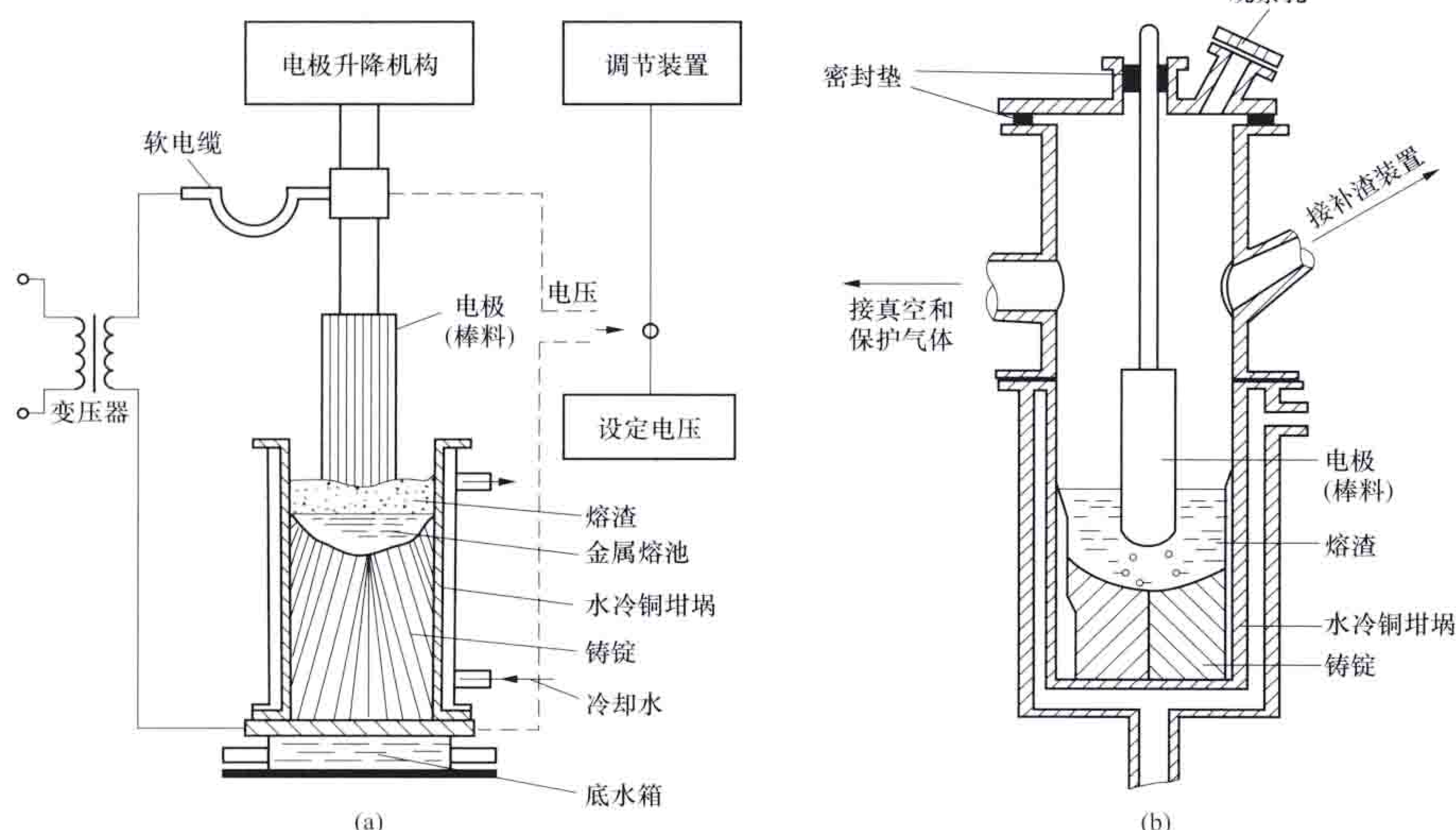


图2　电渣重熔炉原理示意图

(a) 大气状态重熔；(b) 真空状态重熔

渣料成分随所炼金属种类而异。炼钢用的渣料多数含大量氟化钙（50%～95%），其熔点为1200～1450℃，渣液密度为2.5～3.3g/cm³，电阻率在1600℃时为0.15～1.00Ω·cm。

特点和用途　与真空电弧炉和电子束熔炼炉（见电子束加热）相比，电渣重熔炉的特点有：①由于存在熔滴与熔渣的冶金反应，去除非金属夹杂物效果好，重熔后金属纯度高、热塑性好。②一般用交流电和在大气状态重熔，特殊工艺需要真空，设备相对简单、投资少、生产成本低。③更适于生产大直径铸锭和异型铸锭。大气状态电渣熔炼不适于精炼钛、锆、钼等易氧化的金属，真空电渣重熔可以精炼铝、钛、银等合金。④电渣重熔烟尘对环境污染较大，需有除尘和去氟装置。

设备构成　由炉体、供电系统、控制系统和必要的辅助设备组成。炉体包括电极立柱和升降机构、电极夹头、水冷铜坩埚、底水箱和冷却水系统等。供电系统包括电炉变压器、开关柜和供电线路。控制系统包括电极升降调节装置、冷却水压力与温度监控系统等。辅助设备主要包括化渣炉和排烟除尘装置等。

所用自耗电极由其他熔炼炉炼制的金属材料制造或锻造而成，一般要用机械加工或酸洗的方法去除表面氧化皮和污垢，并涂上保护涂料。

结晶器有两种形式：一种底部固定；另一种底部连接抽锭机构，可往下抽动，制取长铸锭。

电渣炉通常用交流供电，有单相，也有三相；根据铸锭的形状常用每相一根电极，也可用2根、3根或多根电极，多根电极在炉内须对称布置。为降低线路电抗，提高功率因数，采用双线制供电线路供电（往返导线，见短网），或用低频（如3～10Hz）交流供电，也有用直流供电的。电炉变压器的二次电压为80～130V，分5～8级或连续可调，炉子的工作电流每100mm坩埚直径为1500～3000A，并可在适当范围内调节。重熔炼钢的电耗为700～1800kW·h/t。

控制系统的主要任务是调节重熔电压与电流的大小、电极下降速度、抽锭速度等，以获得平坦宽阔的熔池，使金属晶粒尽可能沿轴向生长，生产优质铸锭。

中国在电渣炉设备中采用了一些新技术：低频电源供电，保证三相平衡的供电；双极串联重熔，大幅度降低电耗，提高熔化率，节能效果明显；结晶器移动式抽锭，成功解决大型钢锭重熔时的结晶器配置问题；配置保温设备，实现钢锭在线保温。

历史与发展　电渣重熔精炼方法是美国人R.K.霍普金斯（R.K.Hopkins）于1939年依据埋弧加热的原理首先提出的。1954～1955年，苏联Paton研究所根据电渣焊接原理开发了电渣重熔工艺与设备，开创了电渣重熔炉的工业应用。20世纪60年代中期，由于航空、航天、原子能等工业的发展，电渣重熔炉在苏联、西欧各国和美国得到较快发展。炉子容量一般为0.5～2.5t，仅用于生产优质合金钢，高温合金，精密合金，耐蚀合金以及铝、铜、钛、银等有色金属的合金。1980年世界电渣重熔钢的产量已超过120万t。随着电渣冶金的发展及金属材料要求的不断提高，钢锭大型化已成为电渣冶金发展的必

然趋势。80年代中期，很多国家都有了50t以上的电渣炉。

世界上电渣冶金技术先进的国家是乌克兰、美国、中国等，应用电渣冶金成熟的国家有俄罗斯、瑞典、法国等，掌握电渣冶金技术的有意大利、西班牙、卢森堡等。中国的电渣炉无论在技术上或生产容量上都处于世界领先地位，电渣炉试验方法和安全方面的IEC国际标准均以中国为主起草制定。

中国于1960年建成第一座电渣炉，其后有很大发展。60年代建成双臂交替、连续抽锭电渣炉，80年代初国内最大的电渣炉在上海重型机器厂建成，可生产重达200t的钢锭。2005年，上海重型机器厂有限公司投建450t电渣炉（450t电渣锭相当于600t普通钢锭），是世界上最大的电渣炉。

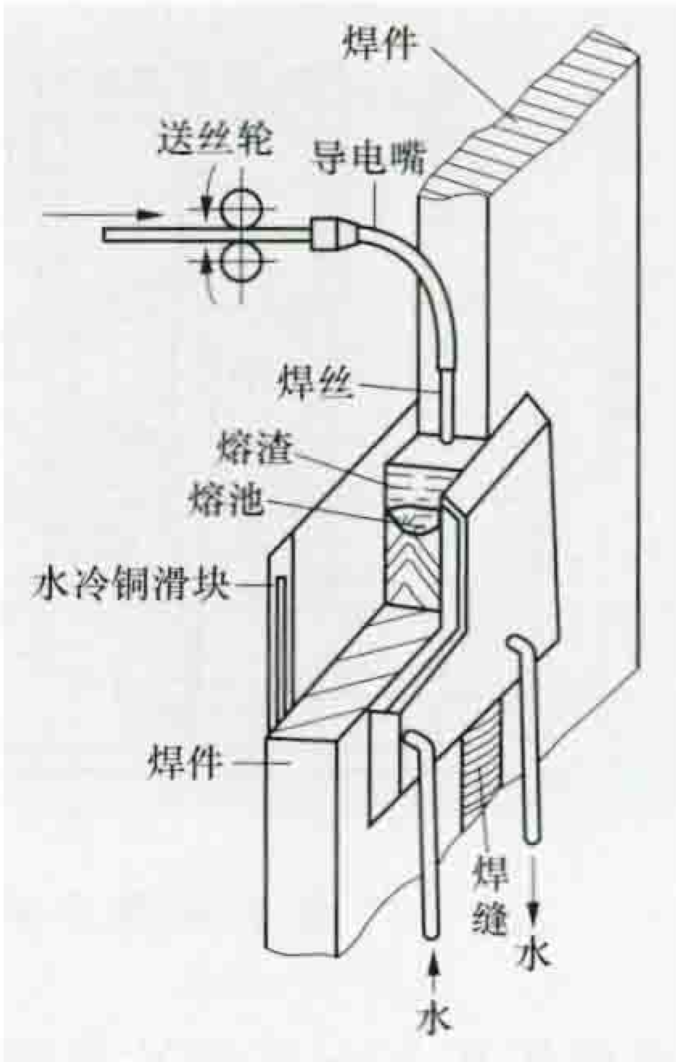
电渣冶金技术的发展令人瞩目，高压电渣重熔（PESR）和真空电渣重熔（VESR）使重熔金属质量达到高纯水平；电渣热封顶（ESHT）生产巨型钢锭，具有技术与经济上的潜在优势；电渣连铸（ESCC）使重熔小方坯质量提高，成本降低。

dianzhahan

电渣焊（electroslag welding） 以电流通过液态熔渣所产生的电阻热作为热源，将焊件和填充金属熔合成焊缝的垂直位置的焊接方法。电渣焊1951年由苏联巴顿（Paton）电焊研究所开发，问世以来一直是大厚度焊件的高效焊接方法，在厚壁压力容器、重型机械和造船等工业中得到广泛应用。电渣焊用于碳钢、低合金钢、不锈钢、镍和镍合金，以及铝和铝合金等大厚度（20～1000mm以上）焊件的焊接。

焊接时由水冷铜滑块与焊件构成的凹槽贮存熔融金属和熔渣；焊丝向下连续送入渣池；焊接电流通过熔渣时产生的电阻热（见电阻加热）使熔渣保持熔融状态并对焊丝和焊件加热；焊丝熔化后沉积在熔渣层下，并与熔化了的焊件金属一起形成金属熔池；随着水冷铜滑块的上移，熔池逐渐凝固成为焊缝。焊接过程中熔渣对熔池起保护和净化作用。

图中示出的是单根焊丝，根据不同的焊接要求，也可用多根焊丝、板状电极，或以熔化导电嘴代替不熔化导电嘴，分别称之为丝极电渣焊、板极电渣焊和熔嘴电渣焊（包括管极电渣焊）。在用熔化导电嘴时，导电嘴是固定的，焊件向上移动，熔化导电嘴的外表面上涂有焊剂，其长度取决于焊缝的长度。



电渣焊示意图

电渣焊设备主要由电源、送丝机构、焊机移动机构、水冷铜滑块和控制系统等组成。电源可用平特性的弧焊变压器或弧焊整流器（见弧焊电源）。焊接电流可大到数千安培。

电渣焊的特点是：①生产效率高；②焊接过程平稳，无飞溅，工作条件好；③焊件不需开剖口，可节省人工和金属材料；④焊缝金属纯净，不易产生气孔、夹渣等缺陷；⑤焊缝一般不会出现淬火组织和冷裂纹。电渣焊由于热输入量大而使焊缝及其热影响区晶粒粗大，通常要经过热处理调整焊接区组织与性能。

dianzhi faguangdeng

电致发光灯（electroluminescent lamp） 由荧光粉在电场的直接作用下发光的电光源。电致发光灯和器件是利用本征型电致发光原理或称德斯特里奥电致发光原理制成的。

电致发光灯的结构基本上是一块平板式的电容器，以荧光材料为介质，其中一个电极透明，可使光从中发出来。灯的荧光粉经过电场激发后，产生黄、绿或蓝色光。如图1所示，电致发光灯可根据其荧光粉键合材料的不同分为有机和陶瓷两大类，而后再根据所用的衬底的不同，进一步将灯分为若干种不同类型。由图2可以看出，电致发光灯具有良好的调光特性。

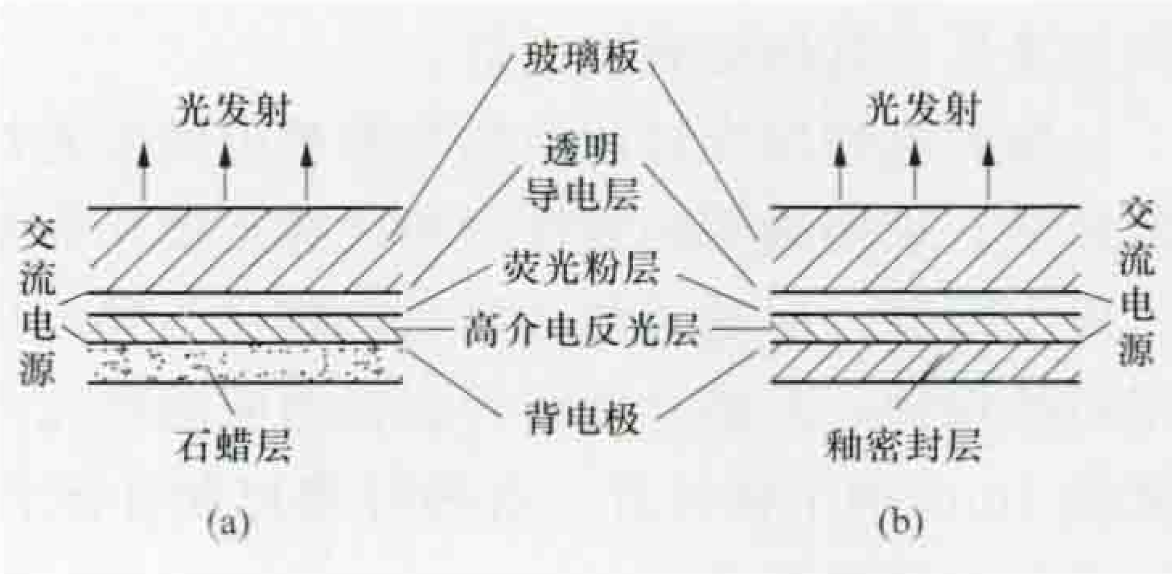


图1 电致发光灯结构
(a) 有机电致发光灯；(b) 陶瓷电致发光灯

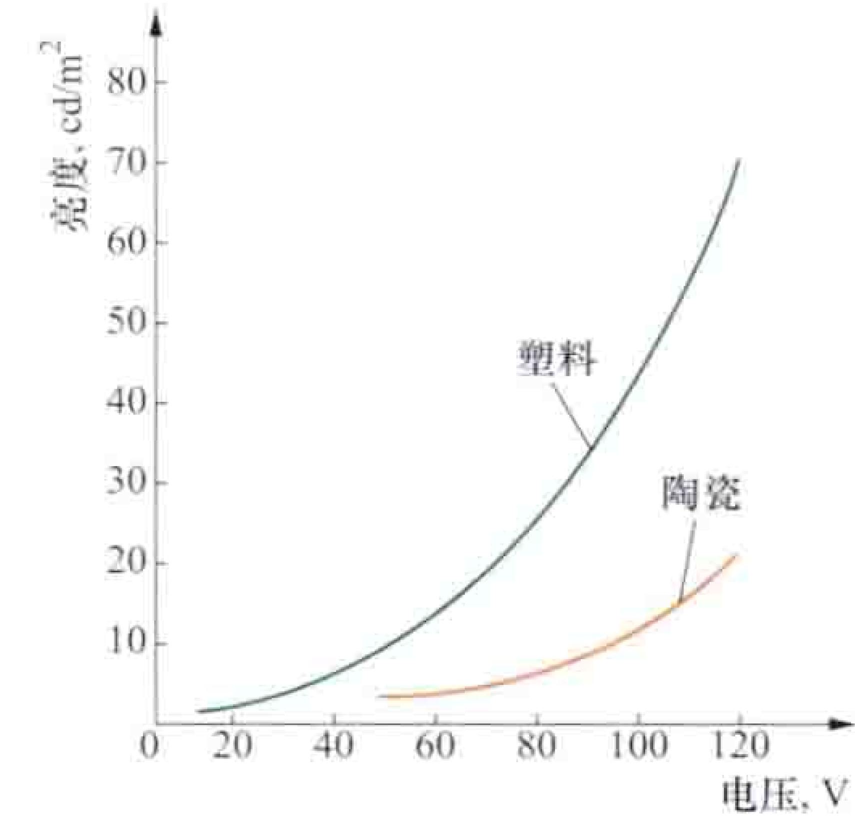


图2 电致发光灯的发光特性

电致发光灯的荧光粉通常以硫化锌为基础，并掺入激活剂，经过电场激发后产生各种色光。灯的发射频带与受紫外线辐射激发的硫化物的发射频带极为相似。不同荧光粉的发光光色见表。

电致发光灯光色表

荧光粉	激活剂	光的颜色
立方形硫化锌	铜、铅	蓝
	铜、铅	绿
	铜、铅、锰	黄
六角形硫化锌	铜	绿
	铜、锰	黄
硒硫化锌	铜	绿—黄
硒硫化锌镉		黄—粉红

电致发光灯的种类和制造方法不同，灯的特性和用途也不同，常用的有有机电致发光灯、陶瓷电致发光灯、玻璃加陶瓷电致发光灯、塑料电致发光灯和直流电致发光灯。

有机电致发光灯采用有机介质材料，将荧光粉和反光粉粘在一块涂有透明氧化锡的导电薄膜的玻璃板上。导体表面先涂一层荧光粉，再涂一层钛酸钡，使光向前发射，并提高整个介质的常数，最后再在背面加镀一层金属或导电性涂料作为电极层。为了防止水分浸入造成介质击穿，需要在灯的背面涂以石蜡和铝箔或其他材料作为防水层。这种结构对简单的方形或圆形电致发光灯是最理想的，主要

用于字母-数字显示和飞机仪表盘的照明。

陶瓷电致发光灯由金属平板、基底涂层、陶瓷层中的荧光粉层、透明导电膜和透明釉面五层组成。灯可做成各种平面形状，板上可以有孔或缝隙，发光面可延伸至距离边缘或孔和缝隙边缘约1mm处。陶瓷结构的灯适合大批量生产，且发光均匀，很少或无需维修，再加上它的寿命长以及坚固耐用等优点，在发光电钟盘面、标志开关的亮圈以及发光标度盘等上面得到广泛的应用。

玻璃加陶瓷电致发光灯除涂层用透明釉而不用有机材料外，在结构上比玻璃上加有机物的灯更能防止水分渗透。但由于正面的导电玻璃片是作为结构的基础，在它上面有多层结构，因而荧光粉也须在灯制成前经过若干次加热，导致灯的亮度低于其他电致发光灯。

塑料电致发光灯的结构与有机电致发光灯相似，所不同的只是它采用透明的韧性塑料代替玻璃作为基底，并在其中一面上蒸镀一层透明的金属氧化物作为导电层。灯的背面不用石蜡保护，而是将基板封装在透明的外壳内，成为一个厚度约1mm的半韧性灯。这种灯难以防止水汽入侵，从而缩短了灯的使用寿命。

直流电致发光灯可分为真空蒸镀硫化锌连续薄膜灯和能使直流电通过荧光粉层的灯。这类灯的稳定性和寿命问题尚待解决，因而未能大量推广应用。

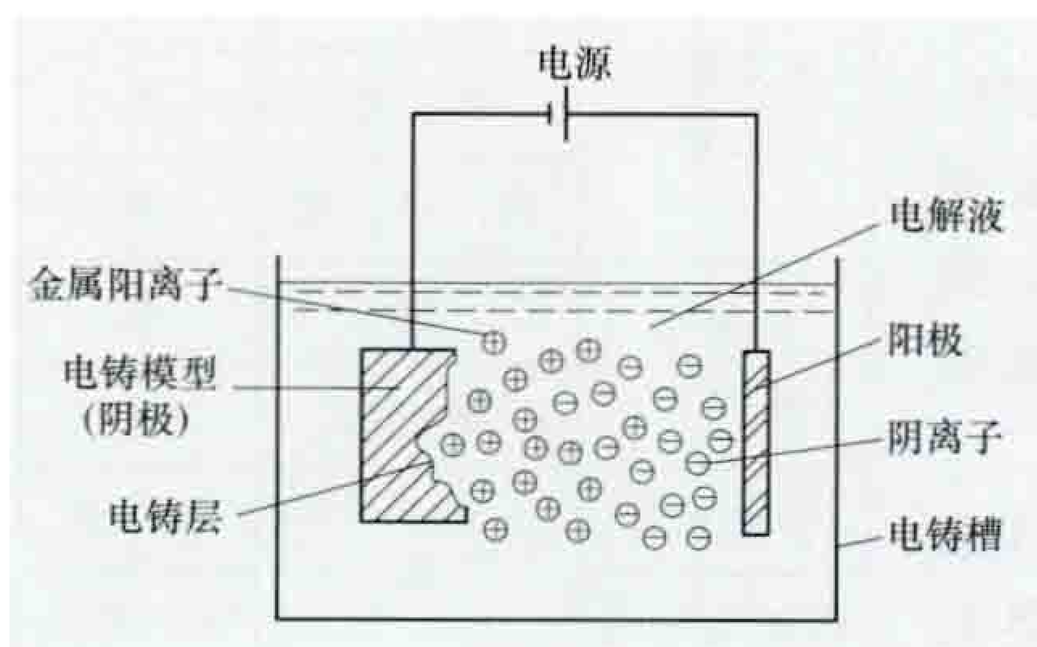
电致发光灯的亮度和光效都较低，难以用它作为空间照明，只能用于发光显示标志或背光照明等场合。

dianzhu

电铸 (electroforming)

采用金属电沉积工艺，对形状特殊、尺寸精确及表面粗糙度要求极高的型面进行复制，或对用常规加工技术难以制造的金属精密制品进行加工的一种特殊制造工艺。所镀金属多为铜、镍、铁等，如印刷铜板、铭牌、各种精密零件等。

电铸和电镀类似，主要区别在于：①电铸镀膜要从模型上脱下来，而电镀镀层是使零件表面具有特定的物化性能或其他性能；②电铸层厚度一般为5～6mm，电镀层厚度为10～20μm；③电铸层内应力应小于100MPa，电镀层可达到200MPa；④电铸在工程中广泛采用的单金属只有铜、镍、铁3种，而电镀得到应用的金属及合金多达数十种。



电铸原理示意图

电铸原理示意见图。以需要铸造的原始物件制成的、可以导电的电铸模型作为阴极，以复制件所需的金属为阳极，在阳极金属盐水溶液中进行电解。当模具表面上沉积了所需厚度的金属层时，即可从电解槽中取出、脱模，得到与模型完全一样的金属复制品。

电铸模型有非金属和金属两种。

非金属电铸模型用合成树脂、石膏、石蜡等制成模型后进行导电处理。导电处理时可用喷涂法、真空镀法或化学还原法在电铸模型表面形成薄银膜，或在其上涂敷细石墨粉的浆液。

金属电铸模型多用铅、铅合金、铜、镍等制作。利用原始物件，以铸造、加压成型等方法，将上述金属制成电铸模型。对金属电铸模型也要进行表面处理以利脱模。表面处理时可在金属电铸模型上生成氧化膜，也可以像处理非金属模那样，在其表面上生成薄银膜或涂敷石墨粉浆液。

参考书目

陈钧武，何士桓．电铸原理与工艺．北京：化学工业出版社，2010.

dianzi daoti

电子导体 (electronic conductor)

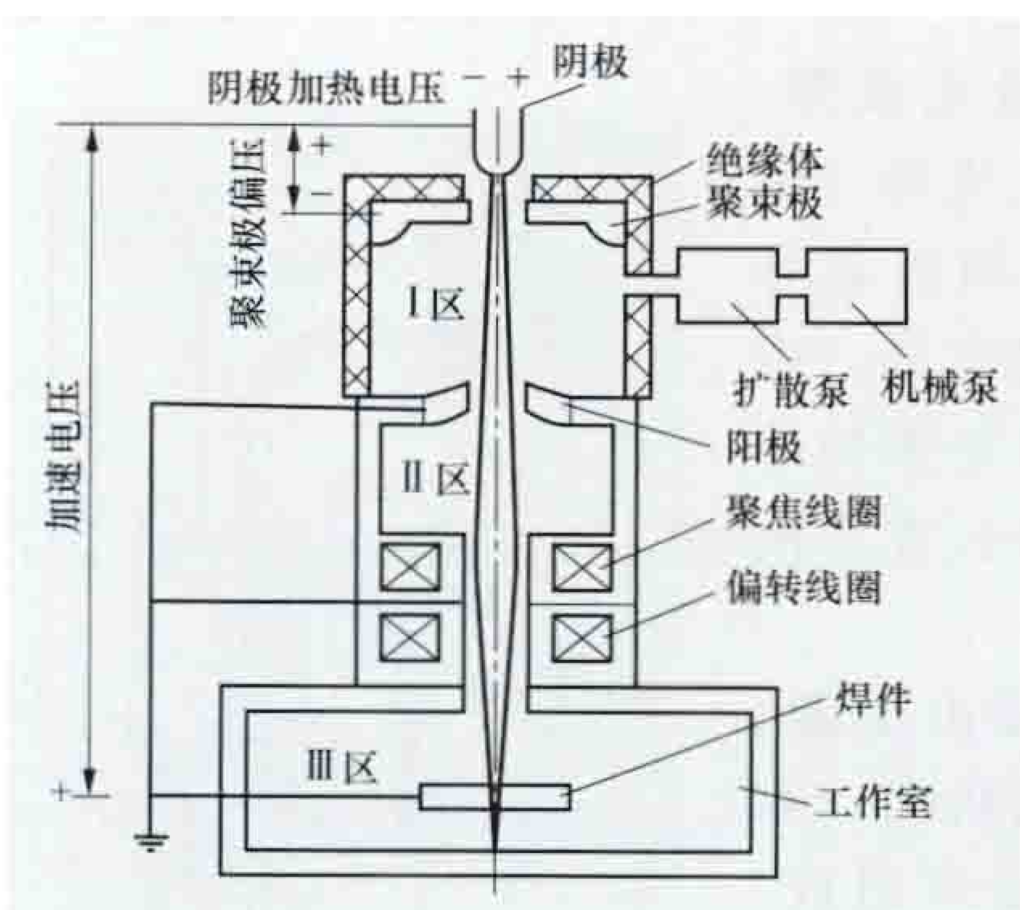
由自由电子传导电流的物质，又叫第一类导体。常见的电子导体有金属、石墨、某些氧化物（如 PbO_2、Fe_2O_3 等）和碳化物（如WC）等。电子导体依靠自由电子的定向运动而导电，电流通过电子导体时，除导体温度升高外，导体本身不发生变化。金属结晶格中的阳离子与其价电子的联系很弱，价电子的行动极为自由，在没有外电场作用时，电子无秩序地向各个方向移动，当加上外电场时，电子即向正极方向流动，在导体中形成电流。通常规定与电子流动方向相反的方向为电流的正方向。温度升高时，电子移动的阻力增大，所以电子导体的导电能力因温度升高而降低。

dianzishuhan

电子束焊 (electron beam welding)

利用经加速和聚焦的电子束轰击焊件接缝处所产生的热能使金属熔化的一种焊接方法。主要用于焊接轻金属和高熔点、高活性金属，如钨、钼、钽、铌、铍和锆等，应用于核能、航空航天、机械、化工、电子等工业部门。

如图所示，从阴极发射的电子，受阴极与阳极间高压电场的加速，通过带孔的阳极，再经聚焦线圈会聚成截面积小（直径为0.2～1mm）、功率密度高（≥1.5×10^5 W/cm^2）的电子束。当电子束撞击焊件时，其动能大部分转化成热能（见电子束加热），使焊件金属熔化形成熔池。随着电子束的移动，熔池冷凝成焊缝。电子束的移动可由移动电子枪（电极和聚焦线圈等的组合件）或焊件来实现；在小范围内可由偏转线圈所产生的磁场来实现。加速电压在30～200kV范围内。为保护电极不受氧化，电极区（图中的Ⅰ区）必须保持压力不大于 1×10^{-2} Pa的高真空。工作室的压力常高于电子枪室的压力，两者间有减少漏气的设施。工作室一般另配真空泵抽气。



电子束焊示意图

特点　真空环境中的电子束焊与其他熔焊方法比，其优

点是：①高能电子束能获得窄而深的穿透型熔化焊缝，焊缝深宽比可达 50∶1；②对焊件的输入能量小，因而焊件的热影响小，变形小；③焊接参数（功率、束径、工作距离等）可各自在很宽的范围内调节，还可进行脉冲调制、扫描等，焊接精度高、适应性强、工艺再现性好；④焊缝受电极材料和空气的污染极小（如在 1×10^{-2}Pa 真空度下，焊缝污染程度只约 0.1μm）；⑤可用来焊接除黄铜、铸铁等少数金属外的所有同类金属，包括活泼金属、难熔金属等以及它们的合金，也可用来焊接某些异种金属，如不锈钢与铜合金，耐热合金与钼或钨等；⑥大批量生产条件下，焊接成本只有气体保护电弧焊的几分之一。电子束焊的缺点是：①设备投资大；②只能焊接特殊形式的接头；③因电子束束径小，焊件接缝间隙必须很小，电子束与接缝容易错位，为此，焊接接头必须经过准确的非破坏性检验方法检验；④焊前焊件表面必须仔细清理；⑤真空中焊接时，焊件尺寸受真空工作室尺寸的限制；⑥夹具应当用非磁性材料制造，或先经退磁，以防电子束偏移接缝。

分类　电子束焊按焊件所处的工作室内的真空度分为高真空焊、低真空焊、局部真空焊和非真空焊 4 类。各类电子束焊的性能参数见表。

各类电子束焊的性能参数

类　别	高真空焊	低真空焊	局部真空焊	非真空焊
工作室压力（Pa）	10^{-4}～10^{-1}	1～10	约 1	约 10^5
加速电压（kV）	15～175	60～150		100～200
焊件尺寸	小于工作室尺寸		大于工作室尺寸	不受限制
工作距离（mm）	50～800	250～500		4～25
电子束穿透深度（mm）（以 75kW 电子枪，不锈钢焊件为例）	>100	约 100		约 50

焊接设备　有高真空、低真空、局部真空和非真空电子束焊机，各类焊机主要由电源、机身、电子枪、光学观察系统（望远镜或有线电视）、真空系统、控制系统以及焊件操作系统等部分组成，可以是自动的或半自动的。电源分低压（30～60kV）和高压（100～200kV）两种。低压型电子枪可以装在真空室内并沿多个轴运动，用普通钢板就可满意地屏蔽 X 射线。高压型电子束能量密度高，需用铅板严密地屏蔽 X 射线。根据焊接工艺需要，可在一个真空室内装几支电子枪，同时对焊件不同部位进行焊接。

dianzishu jiare

电子束加热

（electron beam heating）　利用被电场加速的一个或多个电子束轰击物料时所产生的热能而进行的电加热。电子束加热原理如图 1 所示，阴极接负高电位，阳极接地，聚束极通常与阴极同电位或更低，阴、阳极间形成加速电场。被灯丝加热到一定温度的阴极所发射的电子在加速电场的作用下形成电子束并被加速到很高的速度（电压为 25kV 时，电子速度达 9.4×10^4km/s）。电子束通过阳极孔后进入等电位空间，由于电子之间相互排斥，电子束会逐渐发散。聚焦线圈用来对电子束进行聚焦，使之保持一定形状。偏转和扫描线圈用来按加热要求改变电子束的方向。电子束轰击被加热物料时，其绝大部分动能转变成热能使物料加热，只有很小部分被散射电子和二次电子带走以及转变成 X 射线。

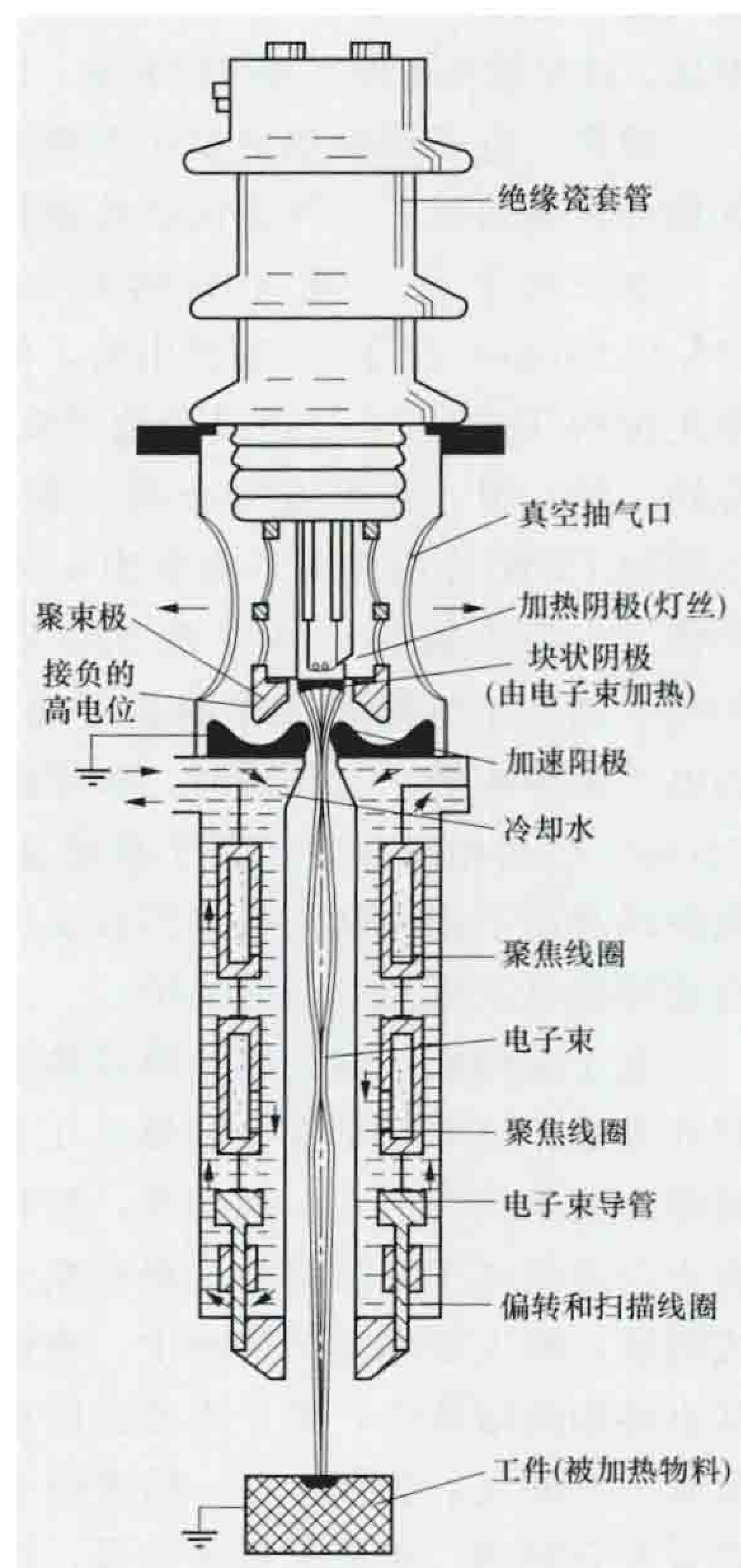


图 1　电子束加热原理图
（注：图中工件上部为间热式轴向电子枪）

电子束加热的特点：①加热功率可以集中在很小的面积上，功率密度高达 10^6 ～ 10^9 W/cm^2；②控制精度高，功率密度、轰击时间和位置等都可精确调节和控制；③加热和熔炼在真空中进行，物料少受污染，真空冶金效果好；④设备较复杂，一次性投资较大；⑤工作时会产生 X 射线，须加防护。

装置构成　主要由电子枪、工作室、真空系统、高压电源等组成，并普遍采用计算机程序控制。

电子枪　用来产生电子束的器件。电子枪有轴向、环形、横向等几种，以轴向电子枪用得最多。轴向电子枪又分为间热式和直热式两种。间热式轴向电子枪的阴极用钨或钽制成，由灯丝发射的电子轰击而达到发射电子的温度（钨阴极为 2750～2850K，钽阴极为 2400～2550K）。间热式轴向电子枪的优点是发射面积大、束电流大、阴极使用寿命长（可达 100～150h），适合于大功率（数百千瓦至上千千瓦）使用；缺点是结构较复杂，灯丝与阴极间另需一套直流电源。直热式轴向电子枪的阴极通常是绕成螺旋状的钨丝，通电加热后自身发射电子束，优点是结构简单，缺点是发射稳定性差、功率小（一般不超过 60kW）。环形电子枪的阴极呈环状，靠近被加热物料，工作时易被沾污，寿命短（有的只有几小时）。横向电子枪的阴极位于被加热物料的侧面，由横向磁场将电子束偏转到被加热物料上，阴极寿命约 50h。后两种枪只在特殊情况下使用。

工作室　通常是用不锈钢制成的真空容器，必要时外周用水套或水管冷却，内部有工作台或坩埚，物料支承、输送机构等；外壳壁上有连接电子枪、真空机组、测温装置等的连接法兰和连接装置。

真空系统　由机械泵、增压泵和扩散泵等组成。工作室真空度一般为 10^{-1}～10^{-3}Pa；轴向电子枪通常另配一套真空机组，枪室真空度在 10^{-3}Pa 以上。

高压电源　电子枪在直流高压下工作，如熔炼炉的工作

电压为10～35kV，焊接设备的为30～200kV。电源用三相桥式整流器，整流元件用高压硅堆或高压晶闸管。电压调节通常用饱和电抗器、磁性调压器或晶闸管调压。高压电源配有过电压、过电流和各种联锁保护装置，以确保人身和设备的安全。

应用 电子束加热主要用于难熔金属、某些活泼金属和优质合金钢熔炼，工件表面热处理和精密加工等。

电子束熔炼 电子束熔炼的概念是M.V.皮拉尼（M.V.Pirani）于1905年提出的，但直到20世纪50年代中期美国的Tomoscai公司成功地开发电子束熔炼炉后才在熔炼钨、钼、钽、铌等难熔金属中获得工业应用。1959年民主德国LEW公司开发了功率为45kW的电子束熔炼炉，60年代又先后研制出200kW和1200kW的电子束熔炼炉。80年代，该公司与苏联合作制造了能够生产30t和100t钢锭的电子束熔炼炉。与此同时，联邦德国的LH公司和美国的Consarc公司相继开发了用于难熔金属熔炼的电子束滴流熔炼炉以及用于回收钛废料生产钛锭、钛板坯和熔炼超强高温合金锭的电子束连续流熔炼炉。

电子束熔炼炉通常用间热式轴向电子枪，有时一台设备配几支枪，呈环状布置，以便从几个方向轰击炉料。熔炼分滴熔和池熔两种形式。滴熔时，原料制成棒状，从水平或垂直方向进到电子束通路中。料棒端头受电子束轰击后，熔化成熔滴，滴入坩埚内的熔池中。池熔时，原料呈颗粒状或粉状直接加到熔池中，电子束轰击熔池表面使之熔化。前者冶金效果（除气、去杂）好，后者便于调整合金成分，因此两者常配合使用。坩埚又叫结晶器，用铜制成，外周用水或其他液体冷却，随着熔炼和拉锭作业的进展，熔池底部金属逐渐冷凝，最后形成锭子。

电子束熔炼是在较高真空下进行的，与其他真空熔炼法（真空感应熔炼，真空电弧熔炼）相比，熔炼成本较高，生产率较低，但可制取高品质的优良锭子。

电子束热处理和精密加工 由于电子束具有作业面积小、功率密度高、功率大小和加工位置易精确控制、加工变形小、洁净和可实现工件自身淬火进行快速表面硬化等优点，常用于其他电加热方式和机加工方法无法解决的，对形状复杂的、精细的关键零件的热处理和精密加工，而且发展迅速、应用日趋广泛。图2所示为电子束热处理装置示意图。其电子枪结构与用于熔炼的稍有不同，多一个栅极和扫描系统，前者用以控制电子束电流的大小，后者控制电子束扫描；工作电压更高。电子束流（束斑最小直径为0.5mm）通过小孔进入工作室，轰击工件表面使其加热和进行各种热处理。工件放在数控工作台上，工作台可作X、Y轴方向平面运动，也可作水平和垂直方向旋转。为节省工作室的抽真空和放气时间，提高生产率，该装置可为多工位结构。全套装置由计算机控制。

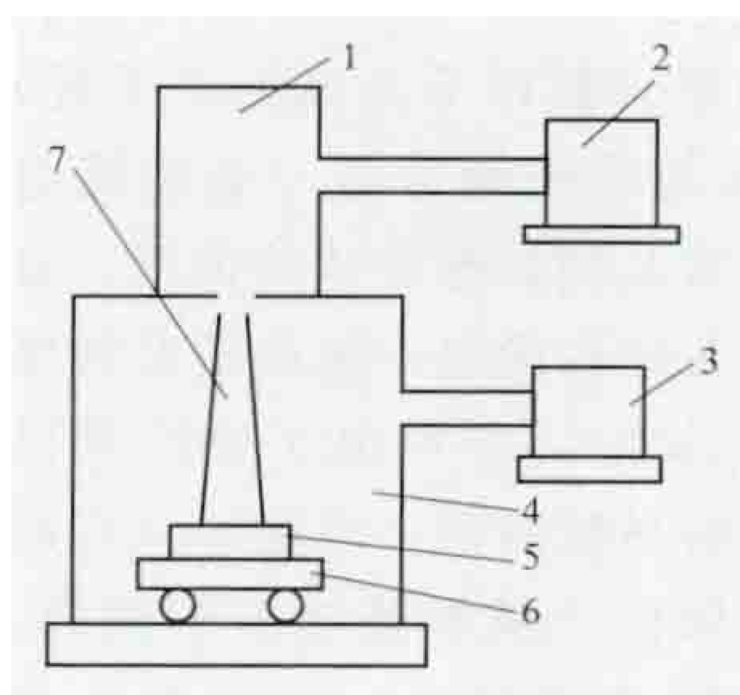


图2 电子束热处理装置示意图

1—电子枪室；2—高真空系统；3—低真空系统；4—工作室；5—工件；6—工作台；7—电子束

电子束精密加工装置又称电子束加工机，其结构和工作情况与电子束热处理装置大同小异，在各工业部门广泛用于精密切割、铣、打孔、抛光、刻蚀和焊接等。

其他应用 电子束的应用很广泛且还在不断扩展，如用电子束区域精炼炉来制取半导体材料，用电子束凝壳炉进行真空熔炼和浇铸，用电子束加热进行蒸发镀膜和烟气排放处理等。

dianzuhan

电阻焊

电阻焊 (resistance welding) 将被焊工件压紧于两电极之间并通以电流，利用电流流经工件接触面及邻近区域产生的电阻热将其加热到熔化或塑性状态，使之形成金属结合的一种焊接方法。主要用于汽车、船舶、铁道、家用电器和电子器件等的制造。

与电弧焊相比，电阻焊具有热影响区小、变形小、焊接速度快、焊接表面质量好、劳动条件好、容易实现机械化自动化等优点，可用于碳钢，低合金钢，不锈钢和镍、铝、镁、钛等有色金属及其合金的焊接。但电阻焊受焊件形状和接头形式的较严格限制，适用面比电弧焊窄。

分类 电阻焊按焊接方法可分为点焊、凸焊、缝焊和对焊4种。按照电阻焊电源频率可分为工频电阻焊和高频电阻焊，其中高频电阻焊发展较晚（见高频焊）。

点焊 焊件装配成搭接接头并压紧在两个端头呈球形或锥形的圆柱电极之间，如图1所示。焊件也可压紧在一个电极与垫板之间。按电极相对于焊件的位置，点焊可分为单面点焊和双面点焊；按一次成形的点焊数，可分单点、双点和多点点焊。点焊适用于薄板的焊接，对低碳钢，单层板厚在1～8mm范围内。

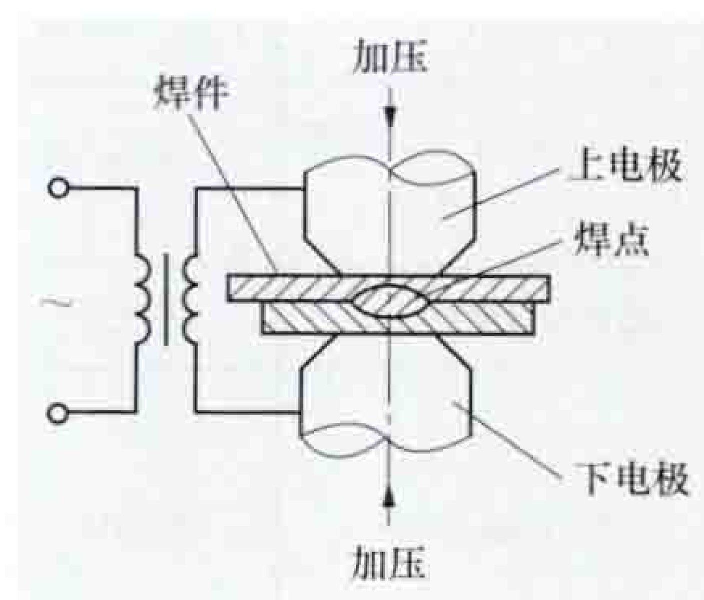


图1 点焊

凸焊 点焊的一种特殊形式。如图2所示，焊接前要先在焊件的一个表面上加工出一个凸起点。焊件凸起点处的电流密度较高，能较快变形熔化，形成焊点。凸焊主要用于将较厚的工件焊接到较薄的工件上去，或两者都是较厚的工件，以及用于有电镀层的金属板的焊接。

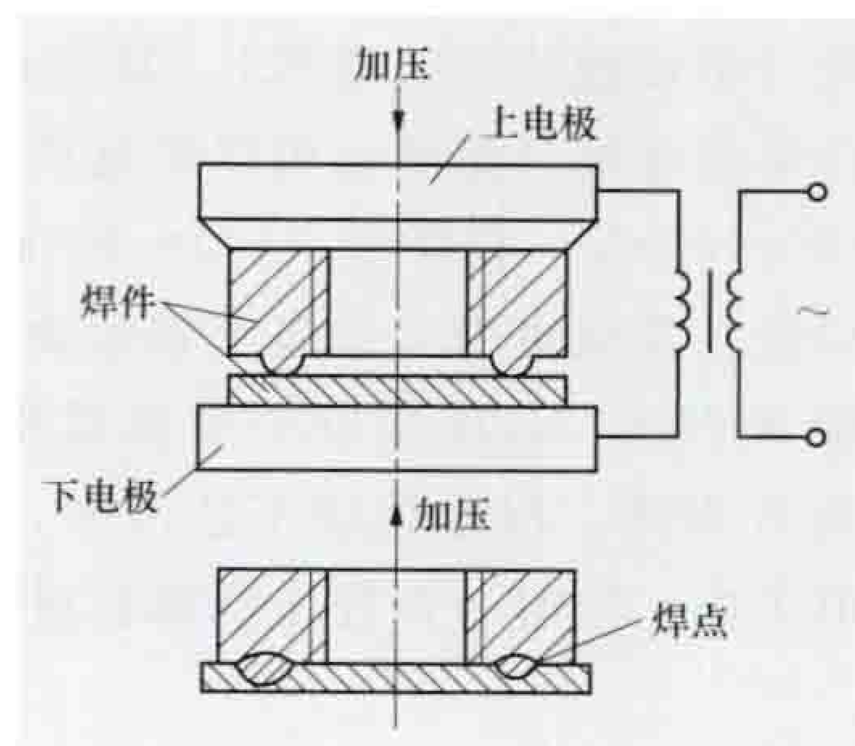


图2 凸焊

缝焊 焊件装配成搭接接头，置于两个滚轮电极之间，如图3所示。焊件也可压紧在一个滚轮电极与导电垫板之间。滚轮对接头施加压力并供电，从而获得由许多彼此相互重叠的焊点所形成的连续焊缝。按滚轮转动和供电方式的不同，缝焊分连续缝焊（滚轮连续转动，电流连续接通）、断续缝焊（滚轮连续转动，电流间歇接通）和步进缝焊（滚轮转动和通电都是间歇的，电流在滚轮不动时接通）3种。

缝焊主要用于焊缝较规则且要求密封焊的薄壁结构。用

于焊接碳钢时，单层板厚一般在 2mm 以下。

对焊　如图 4 所示，两个截面形状相同或接近的工件对头组装成接头。对焊分电阻对焊和闪光对焊两种。

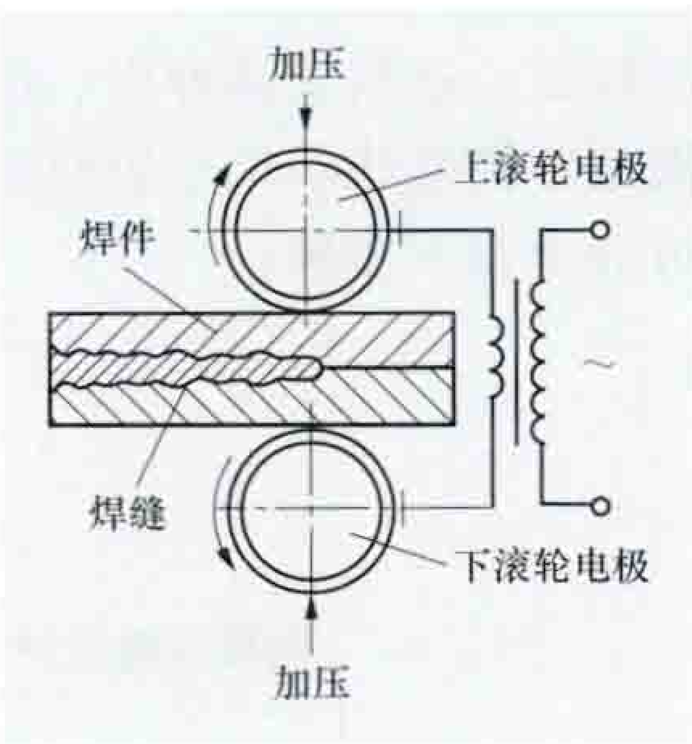


图 3　缝焊

电阻对焊中焊件接头的两端面紧密接触，利用电阻热使接头加热到熔塑状态，然后迅速施加压力以完成焊接。电阻对焊的设备较简单，常用于焊接直径小于 20mm 的焊件，包括有色金属细丝。

闪光对焊是先接通电源，让焊件接头的两个端面逐渐移近达到局部接触，利用电阻热和电弧热加热接触点（这时将产生由弧光放电和飞溅的金属所形成的闪光），使端面金属局部熔化，当端部在一定深度范围内达到预定温度时，迅速施加压力以完成焊接。

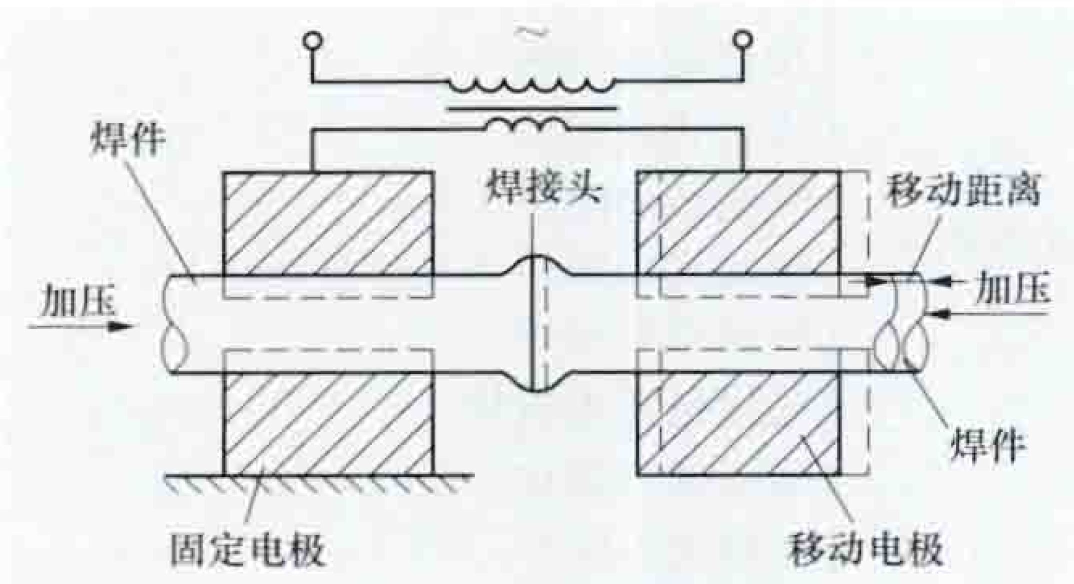


图 4　对焊

闪光对焊有接头加热区窄，端面加热均匀，接头质量易于保证等优点，可用于板材、棒材和管材的对头焊接。板材和杆件的厚度一般为 0.2～2.5mm，棒材直径为 1～50mm。采用专用焊机也可焊接尺寸更小或更大的焊件。

焊接设备　电阻焊所用设备叫电阻焊机。相应的有点焊机、凸焊机、缝焊机和对焊机等。各类电阻焊机除机架外主要由电源、加压机构和控制系统三大部分组成。

电源　电阻焊机所用电源有交流、直流和脉冲电流 3 类。交流频率分为低频（3～10Hz）、工频（50/60Hz）、中频（150～8000Hz）、高频（10～500kHz）4 种。脉冲电流按产生方式有电容储能和直流冲击波两种。各种电源的额定容量和用途见表。各种电源都由 380V 低压配电网供电，

电阻焊所用电源的额定容量和用途

电源类别		额定容量*（kV·A）	用　途
交流	低频		大厚度、大截面铝及铝合金点焊
	工频	5～400	碳钢、低合金铜、不锈钢、铜等的各种电阻焊
	中频和高频	1～400	薄壁管，如罐头、自行车钢管等的对焊
直流（次级整流）		5～200	碳钢、低合金钢、铝及其合金厚板的多层点焊和缝焊
脉冲电流	电容储能直流冲击流	5～100	不等厚度、不等截面、异种金属的焊接，螺柱焊接
		300～1000	焊接质量要求高的大厚度铝及铝合金材料的焊接

*　所列数值对应通用电阻焊机，专用焊机的可能超出。

二次空载电压一般不超过 20V。这类电源的负载是低值电阻，电流大而持续时间短。如点焊两块厚 1.6mm 的低碳钢薄板时，电流约为 12 000A，而时间只约 0.25s；焊 3mm 板时约为 19 000A，0.5s。因此，电源的额定负载持续率低（用于点焊和对焊为 8%～20%，缝焊可到 50%以上）。

加压机构　主要有弹簧杠杆式、电动凸轮式、气压式、液压式和气-液压式几种。前两者用于中、小型焊机，后者用于大、中型焊机。压紧焊件的电极和滚轮由高强度铜合金（如铬铝镁铜、铬铝铜等）制成，使用中一般用水冷却。

控制系统　用来控制焊接过程中的焊接电流、压力和每一焊接周期中各阶段的压力波动，并有监控焊接质量等附加功能。电流控制包括电流的通、断和电流大小的调节。电流通断元件主要有机械开关、电磁式接触器和晶闸管。前两者常用于通电时间较长或控制精度要求较低的脚踏式或电动式凸轮小型焊机中。晶闸管能在焊接电流过零时断开电流，可避免电流对焊接的影响，用于焊接质量要求较高的场合。电流大小的调节对简单的焊机用切换变压器一次抽头的办法，对采用晶闸管的电路则通过改变晶闸管的导通角实现。时间控制用时间继电器和相应的控制电路来实现。时间继电器主要有阻容式、电动机式和计数式 3 种。其中阻容式应用最广，电动机式只在焊接过程时间较长的对焊机中采用，计数式多用于控制精度要求较高的场合。当采用微处理器控制时，其中的时钟发生器就起到定时作用。

历史与发展　电阻焊中的点焊和缝焊是 1887 年美国人 E. 汤姆逊（E. Thomson，1853—1937）发明的。20 世纪 20 年代，闪光对焊开始用于焊接棒材和链条，从此电阻焊进入实用阶段；50 年代以后，半导体器件、集成电路和计算机技术的发展加快了电阻焊的技术进步；80 年代中期逆变式电阻焊机的出现，更好地保证了焊接质量，提高了焊接生产率。20 世纪末，为适应各工业部门的特殊需要，专用电阻焊机，包括焊接机械手、机器人日益得到推广使用。

dianzu jiare

电阻加热　（resistance heating）　利用电流流过导体的焦耳效应产生的热能对物料进行的*电加热*。电流流经导体产生的电阻热值可用公式 $Q=I^2Rt$ 计算求得。式中 Q 为导体所产生的热量，J；I 为通过导体的电流强度（使用交流电时，取其有效值），A；R 为导体的电阻值，Ω；t 为电流通过导体所用时间，s。

电阻加热的特点：①被加热物料无制约，可满足任何材质、形状和尺寸的物料的加热；②工作温度范围宽，物料的加热温度可按工艺要求选定，其最高温度可达 3000℃，并可以得到精确控制；③物料可按工艺要求选择加热环境，如在氧化气氛、真空、各种控制气氛以及在液态介质中进行加热处理（见*真空电阻炉*、*控制气氛电阻炉*、*电热浴炉*等），真空度或气氛的成分均可进行自动控制；④热效率较高；⑤加热温度均匀；⑥对环境污染少，工作条件优越。

电阻加热分间接电阻加热和直接电阻加热两类。

间接电阻加热　电流流过*加热元件*或其他导电介质使加热元件或导电介质产生热量，然后通过热的传导、对流和

辐射使被加热物料间接地得到加热。这是各种电加热方法中应用最广泛的一种，主要用于各种间接电阻炉（见电阻炉）和家用电热器具。

直接电阻加热 电流直接流过被加热物料的电阻加热。这种加热方式由于受被加热物料的性质、形状、尺寸等的制约，使用受到一定的限制。主要用于电阻焊、碳素电极的石墨化、钢丝强韧化处理、玻璃熔化、电渣重熔、盐浴加热等。

dianzulu

电阻炉

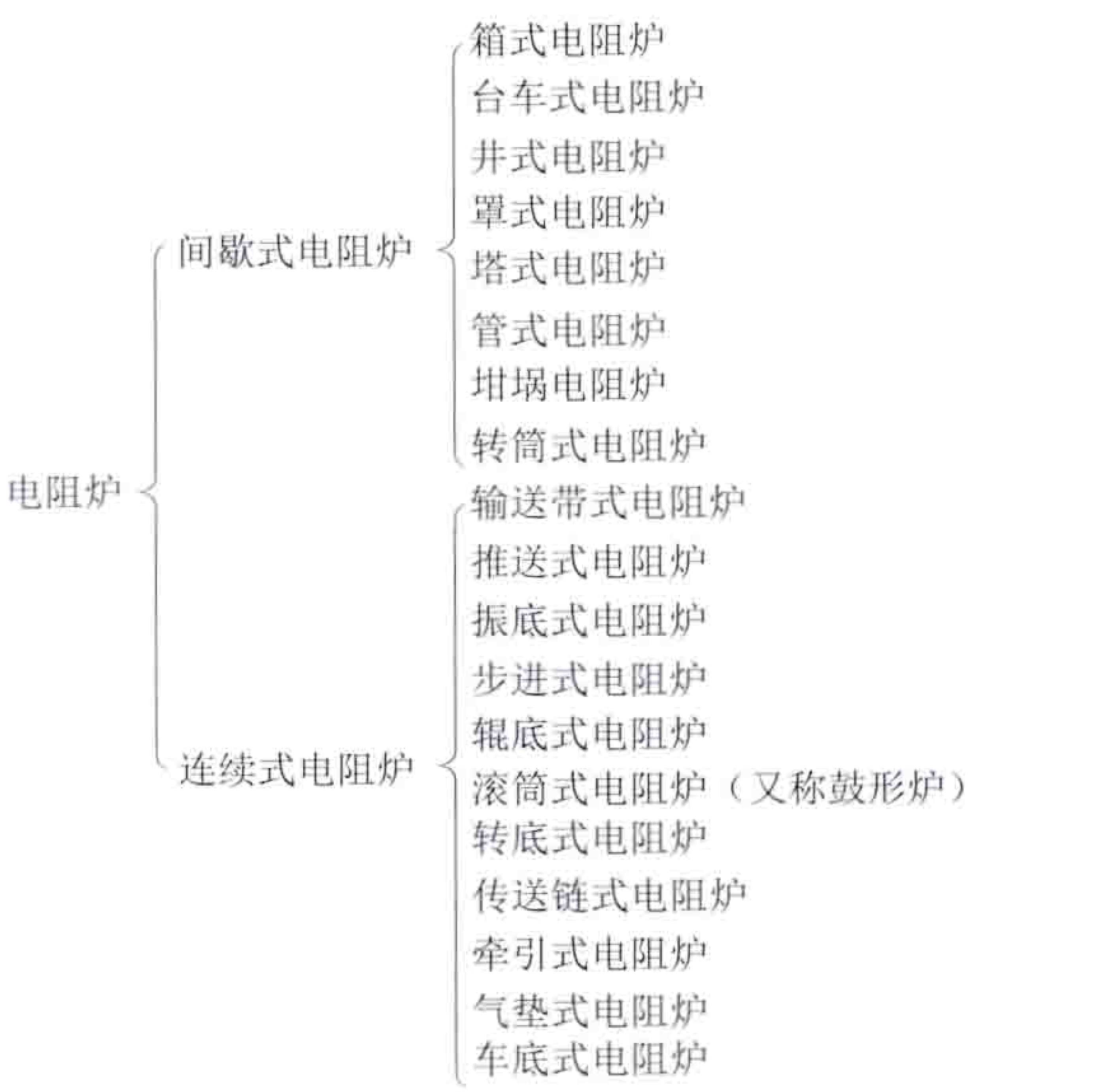
电阻炉 (resistance furnace) 具有炉膛并用电阻加热的电炉。按电阻加热方式的不同，电阻炉可分为间接加热电阻炉和直接加热电阻炉，分别简称为间接电阻炉和直接电阻炉。工业用电阻炉绝大多数为间接电阻炉。

间接电阻炉 加热元件或导电介质通电后产生的电阻热，通过传导、对流、辐射使炉料间接得到加热的电阻炉。

特点和用途 间接电阻炉的炉温和整个加热工艺过程可精确控制，炉内气体成分可根据所处理材质的要求选取和控制，被加热工件在材质、形状、尺寸等方面限制小，还可根据其产品数量和品种及热处理工艺选取不同的炉型。可对机械零件和炉料进行不同的工艺处理，包括淬火、退火、回火、时效、钎焊、烧结以及熔炼等，此外还可进行各种化学热处理；容易实现机械化、自动化，工作环境清洁，噪声及环境污染少，电热效率高。广泛应用于国民经济的各个领域，是电热装置中种类和数量最多的一种。

分类 按炉内介质不同可分普通电阻炉（即自然气氛电阻炉）、控制气氛电阻炉、真空电阻炉、电热浴炉和流态粒子炉5类。各类间接电阻炉的特点和用途见表。

间接电阻炉按作业方式可分为间歇式和连续式两类。间歇式电阻炉在加热过程中，炉料在炉内位置固定不变，适用于被处理炉料品种多、批量小的场合，多为周期作业方式。连续式电阻炉在加热过程中，工件在炉内连续地或有节奏地沿炉长方向移动，同时完成整个处理工艺过程。这类炉子的特点是生产连续进行，生产能力大，炉子机械化、自动化程度较高，适用于品种少、批量大的场合。这两类电阻炉为了满足不同形状、尺寸炉料的热处理工艺需要，其结构形式又可分为如下多种：



按热处理工艺不同，间接电阻炉还可分为淬火炉、退火炉、回火炉、渗碳炉、氮化炉、烧结炉（见图1）、气相沉积炉（见图2）等。

设备组成 主要由炉体和电气控制设备组成。部分间歇炉和连续炉设有进出料装置，真空炉配置有真空机组，控制气氛电阻炉设置有气体发生装置。

（1）炉体。主要由炉壳、加热元件、炉衬、炉门（盖）等部分组成，连续式电阻炉配有炉料输送机构以及其他辅助装置。

各类间接电阻炉的特点和用途

类别	炉内气氛或介质	主要特点	主要用途
普通电阻炉（自然气氛电阻炉）	主要为空气，包括炉料放出的气体	无控制气氛发生装置及供给系统。结构相对简单，但加热过程中炉料氧化脱碳严重	一般加热、热处理、干燥、烧结和低熔点金属如铝、锡、锌等的熔化，此外还可进行金属铸锭的加热和热处理
控制气氛电阻炉	由人工提供并控制的气体	可避免或减少炉料的氧化脱碳，可对机械零件进行各种化学热处理，如渗碳、渗氮、化学物理气相沉积，但某些炉气易爆或对人体有害	金属材料的无氧化、不脱碳加热，可进行机械零件的各种化学热处理，各种钎焊和烧结，难熔金属钨、钼等的热处理及某些电子工业产品烧成
真空电阻炉	炉内压力低于10^5 Pa的空气或抽空后充入其他气体	对炉料有除气和净化表面作用，可进行少或无氧化加热，也可进行化学热处理或熔炼，对环境污染少，操作条件好，但连续大批量生产较困难	活泼金属、难熔金属和某些电工合金等的光亮退火、真空除气，不锈钢和铝材的钎焊，机械零件的淬火、渗碳、烧结，晶体的制取，碳-碳复合材料的沉积，真空压力浸渍、镀膜
电热浴炉	熔盐、碱、油或液态金属	炉料加热速度快且加热均匀，容易实现局部加热。结构简单，不用耐热钢，炉温可达1300℃，可保护炉料不受氧化，但操作条件差，工件处理后要清洗，介质消耗大，易对环境造成污染	工具、量具、模具等工件的热处理，机械零件的化学热处理，工件的淬火加热及等温处理
流态粒子炉	处于流动状态的金属氧化物或石墨粒子	与电热浴炉比，炉子升温快，生产率高，工件加热后不需清理，但粉尘大，介质消耗大	可用于部分零件的淬火、回火、化学热处理，代替部分浴炉

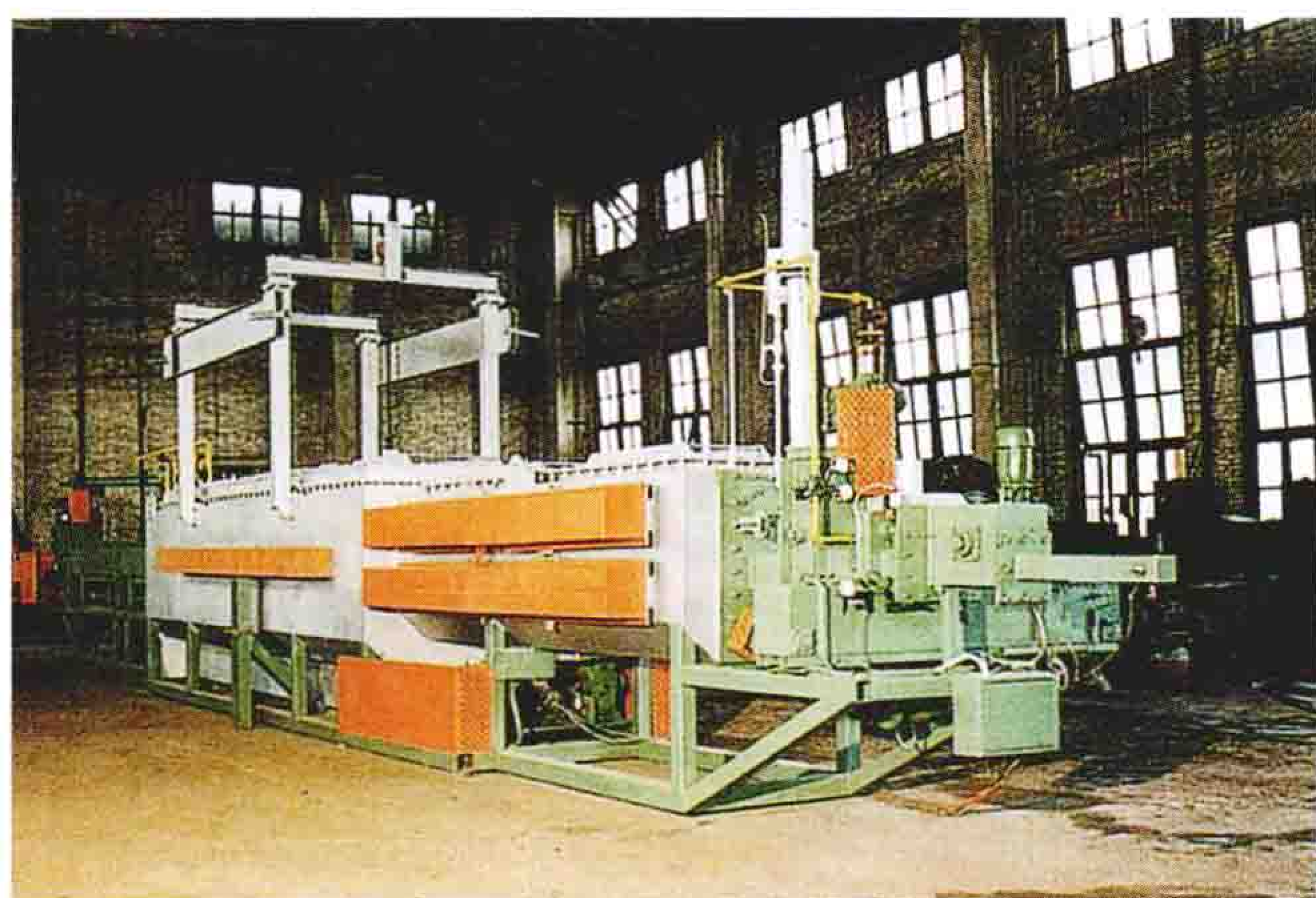


图 1　步进式烧结炉（陈留根　提供）



图 2　化学气相沉积炉

加热元件应根据炉膛结构、工作温度、功率的大小和炉内介质等选择，其在炉膛内的布置应满足炉温均匀度的要求。

炉衬是由耐火材料和保温材料砌筑的隔热密闭的空间腔体，通常由耐火层和保温层组成。耐火层能承受炉子的最高使用温度，根据炉温高低和使用要求，主要由高铝砖、黏土砖、耐火纤维制品或其他耐火材料组成。保温层的使用温度较低，但要求隔热性能良好，通常由硅藻土砖、蛭石及其制品、珍珠岩及其制品、矿渣棉、岩棉、玻璃棉、耐火纤维、硅酸钙绝热板以及新型纳米绝热材料组成。真空电阻炉用金属薄板（钼、不锈钢）、硬软碳毡、碳-碳复合材料、耐火纤维制成隔热屏。

炉膛底部一般全由耐火砖砌筑，在其砌筑的凹槽内放置加热元件，上部有承受炉料的耐热钢构件，如不放置裸露式的加热元件，也可全部由耐火材料砌筑。

连续式电阻炉炉料的输送装置，位于炉膛内部的构件多用耐热钢制成，如输送带、料盘等。少数用耐火砖砌成。输送装置的结构形式随炉型各异。

（2）电气控制设备。间接电阻炉多数由低压配电装置直接供电，少数设备配有降压变压器或调压装置。中国国家标准规定，用电热合金作加热元件的间接电阻炉，其输入功率的最大允许偏差为＋10％；用电阻温度系数变化较大的加热元件，如碳化硅、二硅化钼、钼、钨、石墨等的电阻炉，其功率偏差应在±10％范围内。由于加热元件在使用过程中的氧化或老化，其输入功率会逐渐减少。

间接电阻炉的电气控制设备主要有温度控制设备、程序控制设备、计算机控制设备，控制气氛电阻炉配有炉气控制设备，真空电阻炉配有真空度控制设备。

温度控制设备由控制执行元件、温度调节仪、温度传感器组成。主回路控制执行元件根据温度调节仪给出的信号对输入电炉的功率进行控制，完成整个热处理工艺过程。执行元件一般有交流接触器、晶闸管开关、晶闸管调功器、晶闸管调压器、磁性调压器等。交流接触器只能实现通断的位式控制，控温精度差，已很少采用，普遍使用的是晶闸管。晶闸管一般采用连续控制，有移相和过零触发两种方式。移相触发具有调压特性，可带感性负载，但会对电网产生较大的高次谐波干扰；过零触发主要为调节功率的通断比，对电网干扰小，负载功率波动不大，较适用于阻性负载。磁性调压器可靠性好，短时或瞬时过载能力比晶闸管高，对电网的干扰小，但体积大、价格高，多用在需要降压供电（低于 220V 而电流较大）及在加热过程中负载特性（主要指加热元件的电阻温度系数）发生较大变化的电炉功率控制中。

温度调节仪是将温度传感器传送的信号与调节仪中设定值进行比较，根据比较结果向控制执行元件发出指令信号，该信号分位式和连续变化两种（即通-断开关信号和连续模拟信号）。通常使用的调节仪有动圈式、电子电位差计式、自动平衡电桥式、数字温度调节仪以及微处理机智能仪表等。

电阻炉温度调节方式有位式（二位及三位）、比例积分微分式（PID）等，温度均匀度要求低的用位式控制，要求高的用 PID 调节方式，一般工业生产中基本上都采用 PID 调节方式。带 PID 调节功能的数显智能仪表大多可对工艺曲线编程运行，是一种带有 PID 专家算法的自适应自整定功能的仪表，在设定工艺曲线后，仪表本身可根据炉况用自整定模式对仪表的 PID 参数进行调整，以满足控温精度和运行曲线的要求，无需人工干预。同时，该仪表还具有输出限幅、抗超调抑制、软启动以及通信接口等功能。随着计算机技术的飞速发展，对炉内温度、气氛压力、真空度的测量及传动程序等参数的综合监控已得到日益广泛的应用。

温度传感器是将炉内的温度及温度的变化转变成电信号，分为接触式和非接触式两大类。常用的温度传感器主要有热电偶、热电阻、光学测温仪。此外还有玻璃温度计、压力温度计以及双金属温度计等。

技术指标　间接电阻炉的技术指标有额定功率、额定（工作）温度、空炉升温时间、空载功率损失、炉温均匀度、炉温稳定度、真空度、炉内气氛种类、生产率、表面温升等。

直接电阻炉　电流直接通过被加热炉料并在其中产生热能使炉料得到加热的电阻炉。这类电阻炉的种类很少，主要有电渣重熔炉、石墨化电炉、碳化硅电炉、玻璃窑炉、电接触加热器等（见直接电阻加热装置）。

历史与发展　电阻炉是在 19 世纪中期有了发电设备以后才发展起来的。开始是实验室用电炉，1891 年碳化硅电炉问世，1894、1907 年石墨化电炉、电极盐浴炉先后获得

开发。1906年英国人A.L.马奇（A.L.March）研制成镍铬合金丝，促进了间接电阻炉的发展。20世纪初间接电阻炉已在工业生产中得到推广应用，30年代，由于化学热处理和真空热处理的发展，控制气氛电阻炉和真空电阻炉开始在工业上得到广泛应用。第二次世界大战后，耐火纤维的出现、电热材料、炉内气氛控制技术和热处理工艺等的发展以及对机械零件热处理要求的提高，进一步促进了电阻炉品种的发展和性能的提高。50年代出现了电渣重熔炉，60年代末出现了流态粒子炉。

中国从50年代初开始生产电阻炉，60年代后，为满足国家重点建设需要设计制造了多种带有保护气氛的连续式电阻炉、密封箱式气体渗碳炉、半连续式真空电阻炉等。1970年前后制成无罐推送式气体渗碳、淬火、清洗、回火汽车零件热处理生产线。80年代后，先后研制出全自动密封箱式炉及其热处理生产线、真空离子化学热处理炉、全自动推杆式渗碳热处理自动生产线、连续式真空热处理炉、微机控制大型井式气体渗碳炉、大型真空钎焊炉（见图3）、节能型预抽真空炉、大型晶体生长炉、真空碳化炉、碳-碳化学气相沉积炉等。图4所示为推进式加热炉外形。

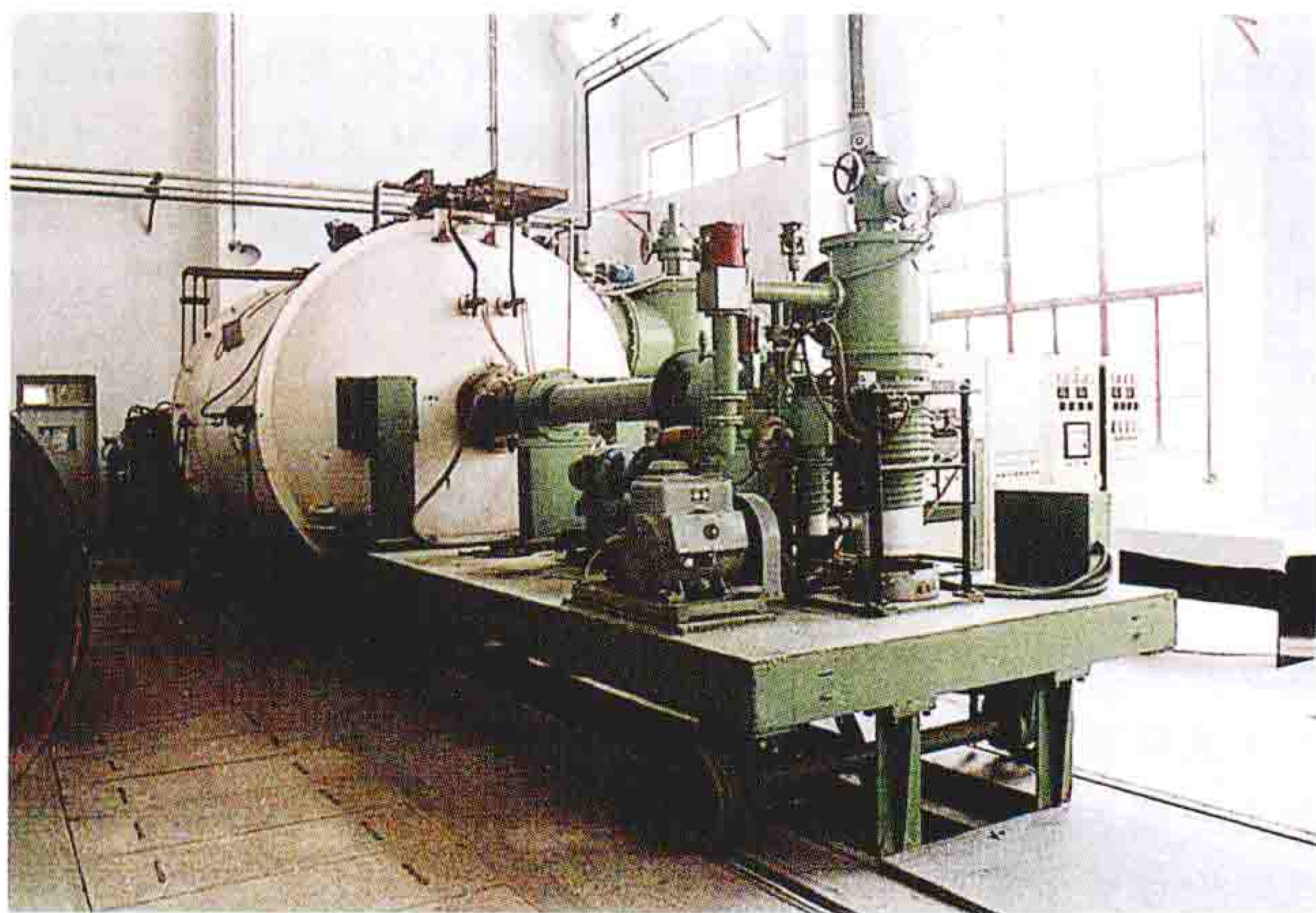


图3　840kW大型卧式真空钎焊炉（陈留根　提供）



图4　推进式加热炉

dianzuqi

电阻器　(resistor)　在电路中限制电流或将电能转变为热能等的电器。电阻器用电阻材料制成。电阻器的基本参数有额定电阻值、额定电流、额定功率、工作制和发热时间常数。对于长期工作制，电阻器的额定功率 $P_N=I_N^2R_N$，其中 I_N 为额定电流，R_N 为额定电阻值。对于短时工作制，如电阻器最高温升限值与长期工作制的最高温升相同，则短时工作制的过载功率 P_S 与长期工作制的额定功率 P_N 的比为功率过载倍数 p_P，即

$$p_P=\frac{P_S}{P_N}=\frac{T}{t}$$

式中 T 为电阻器的发热时间常数；t 为短时工作时间。由上式可知，电阻器的发热时间常数愈大，短时过载能力愈强；通电时间愈短，过载倍数也愈大。

电阻材料　电阻器的电阻材料分金属和非金属两种。常用的金属材料有铜基合金、镍铬铁合金、铁铬铝合金和铁。铜基合金的主要成分为铜镍或铜锰。材料中加入镍后可提高材料的强度，使材料的耐腐蚀、抗氧化性能较稳定。材料中加入锰后可减小材料的电阻温度系数和热电动势。由于锰的价格较贵，故仅用于精密设备中。由于铜易氧化，而镍铬铁合金和铁铬铝合金中无铜的成分，故此类合金的工作温度比铜基材料的更高，并且都有较高的电阻率和机械强度，适用于制成加热元件或功耗元件。非金属材料中比较常用的有碳。此外，还有用液体作电阻材料的，如水可制成水电阻。

分类　常用的电阻器按结构形式可分为管式、框架式、铸铁式等。

管式电阻器是将细的电阻丝绕在瓷管骨架上，外涂瓷釉经烧结而成，见图1。管式电阻器的功耗相对较小，适用于容量不大的电路中。

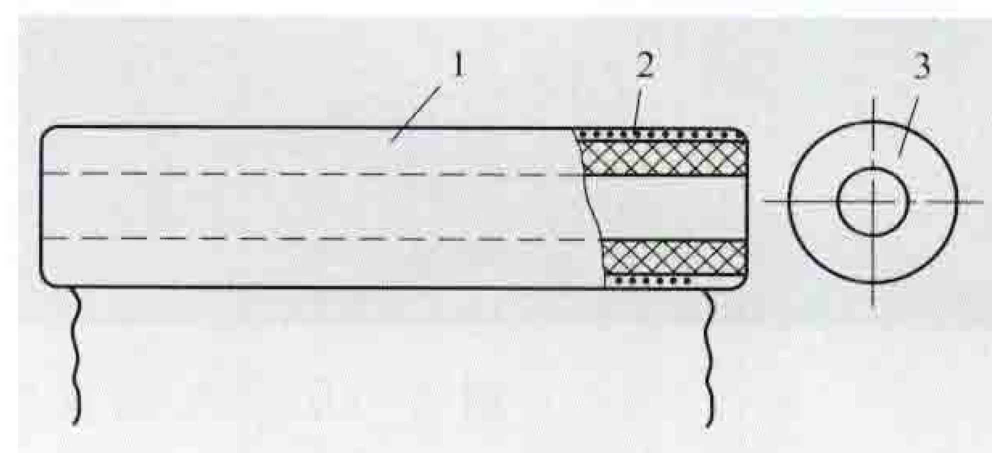


图1　管式电阻器结构

1—面釉；2—电阻丝；3—瓷管

框架式电阻器是用钢板做成骨架，再将瓷槽绝缘插入钢板两边，在瓷槽绝缘上绕上丝状或带状电阻而成。图2所示是一种用带状电阻平绕在瓷槽绝缘上的框架式电阻器结构。电阻元件截面较大时，带状电阻也可立绕成螺旋形结构。框架式电阻器多采用铁铬铝合金制成，机械强度高，材料电阻率大，工作温度高，功率也可做得较大。

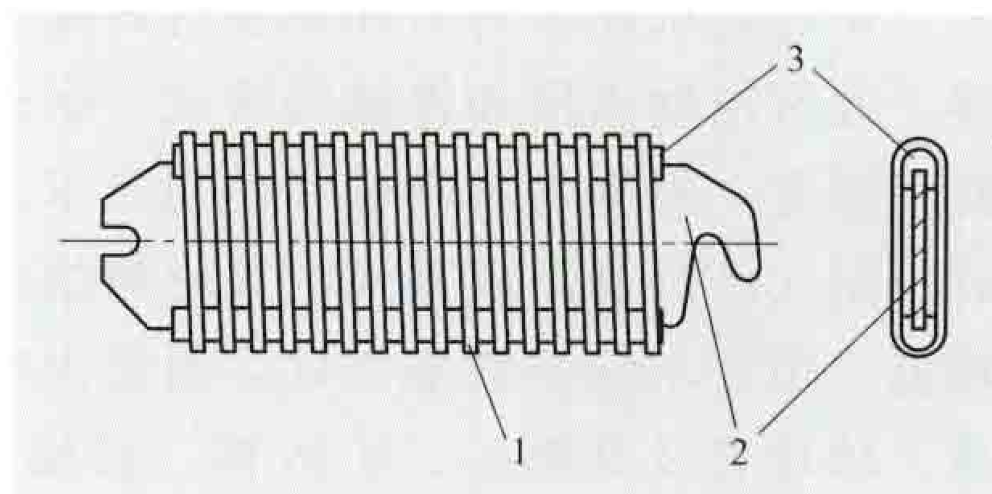


图2　框架式电阻器结构

1—丝状或带状电阻；2—钢板骨架；3—瓷槽绝缘块

铸铁式电阻器用含硅的铁熔炼浇注而成（见图3）。它的截面尺寸及质量较大，比热容较大，短时过载能力强，适用于电动机起动、制动等；缺点是电阻温度系数大，电阻值不稳定，铸铁

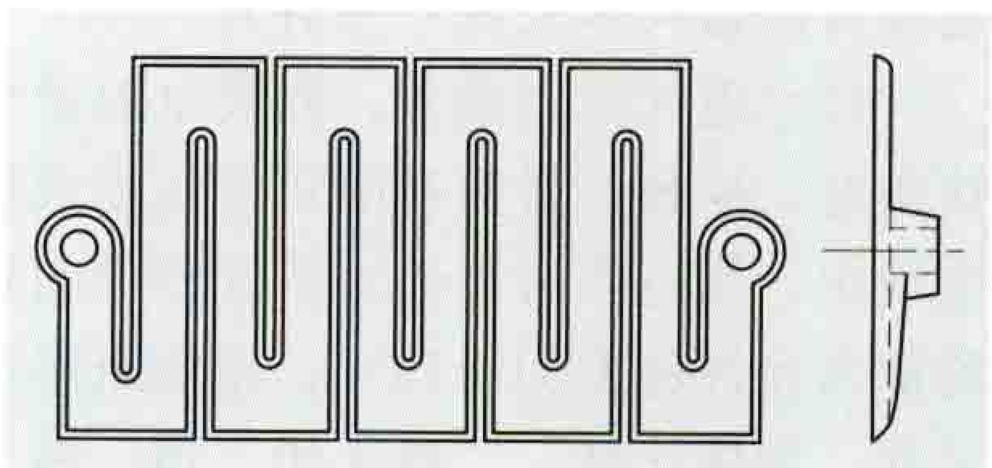


图3　铸铁式电阻器结构

性脆易断，在要求阻值稳定的情况下一般不宜采用。

用途　在低压电路中电阻器可用作起动电阻、调整电阻、放电电阻、附加电阻、负荷电阻和稳定电阻等。

起动电阻用以限制电动机的起动电流，并使电动机起动过程中的电流能保持在一定范围内。它具有工作电流大、电阻值小和工作时间短的特点。

调整电阻用以调整电路内的电流或降低受电电器两端的电压。

放电电阻并联于电器的电压线圈两端或并联于电动机的励磁绕组两端，用以减少电压线圈或励磁绕组开路时的过电压。

附加电阻串联于电器的电压线圈电路内，如串联于接触器或电动机励磁绕组电路内，用以吸收部分电源电压。

负荷电阻用作试验电动机或电器回路的负荷时，用以吸收电能。

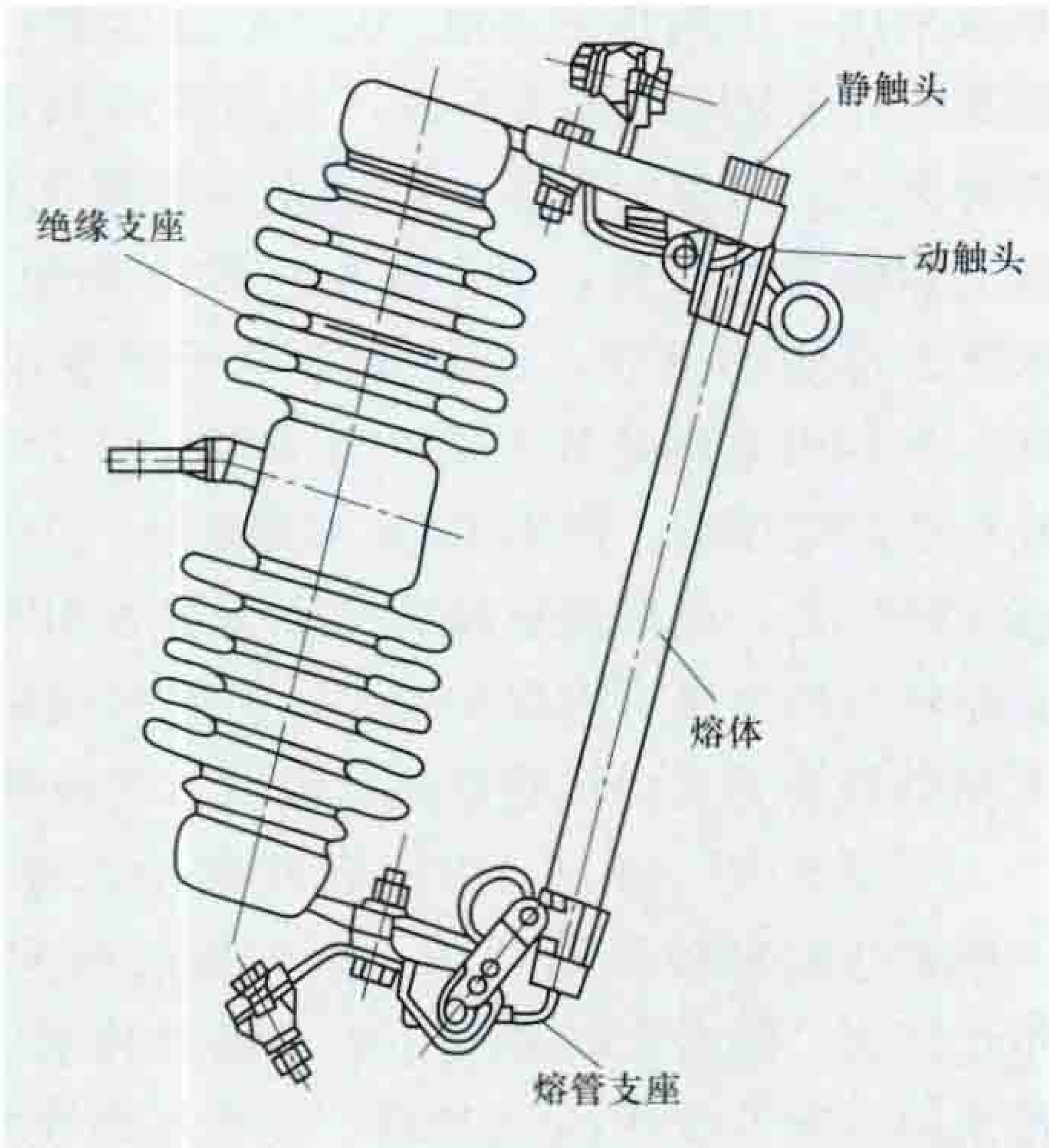
稳定电阻串联于受电电器的电路中，如串联在具有非线性电阻的弧光灯或电弧焊的电路中，吸收部分电源电压以防止电路电流过大。

见变阻器。

dieluoshi rongduanqi

跌落式熔断器　(drop-out fuse)　熔体熔断后载熔件可自动跌落或经人工操作以提供隔离断口的电气设备。广泛用于架空配电线路分支线和配电变压器上作为一种短路保护和投切设备的装置，但一般不具备带负荷操作的能力。跌落式熔断器可分为单管式和双管式两种，常用的跌落式熔断器为单管式，双管跌落式熔断器具有重合闸功能。

跌落式熔断器一般由绝缘支座、动静触头、熔管支座及熔体等部件组成，如图所示。当故障电流通过熔体并持续很短一段时间后，熔体即熔断，熔管内衬的复合材料在电弧作用下产生大量的气体，因熔管上端被封堵或被释压片盖住，气体向下端喷出，拉长并吹灭电弧。熔体熔断后，失去对熔管上下触头的紧固力，在熔管自身重力和上、下静触头弹簧片的作用下，迅速跌落使电路断开，切除故障段线路或者故障设备并提供明显的隔离断口。为保证跌落式熔断器的熔管在故障时能够自动跌落，熔断器安装时熔管轴线与地面垂线之间夹角应为15°～30°。



跌落式熔断器结构示意图

dingshi zhaoming kongzhi

定时照明控制　(timing lighting control)　按人为规定的时间和顺序自动对照明装置或照明系统的工作特性进行的调节或操作，可实现点亮、熄灭、亮度和色调的控制等。定时照明控制用于道路、广场、家庭及工矿企业的电气照明，还用于舞台装饰、广告宣传、节日花灯等方面。定时照明控制有延时照明控制、时序照明控制和程序照明控制。

延时照明控制　当光源被打开后，经过一段时间的延迟，光源自动关闭。这种控制开关多用于楼梯、走廊、门厅、卫生间等不需要长时间照明的场所。使用这种开关可避免人们忘记关灯而造成电能浪费。具有延时照明控制功能的开关称为延时照明开关（见照明控制），又有手动型和自动型两种。

手动型延时照明开关　需要人为地开启光源，常用的有机械式、继电器式和电子式。

机械式延时照明开关是利用某种机械运动规律而实现的一种延时控制。钟表发条式延时开关和气囊式延时开关就属于这一类。

继电器式延时照明开关是通过电子线路实现延时，控制继电器的动作。这种开关由于体积大、造价高，在照明控制上已很少采用。

电子式延时照明开关的控制方法很多，有按键式、轻触式、触摸感应式。按键式和轻触式典型的照明控制原理如图1所示。图1中SB是按键式轻触开关，按一下SB，V导通，点亮照明灯；利用电子线路的延时和自控功能，照明灯自动关闭。改变电容器C的容量可改变延时时间。

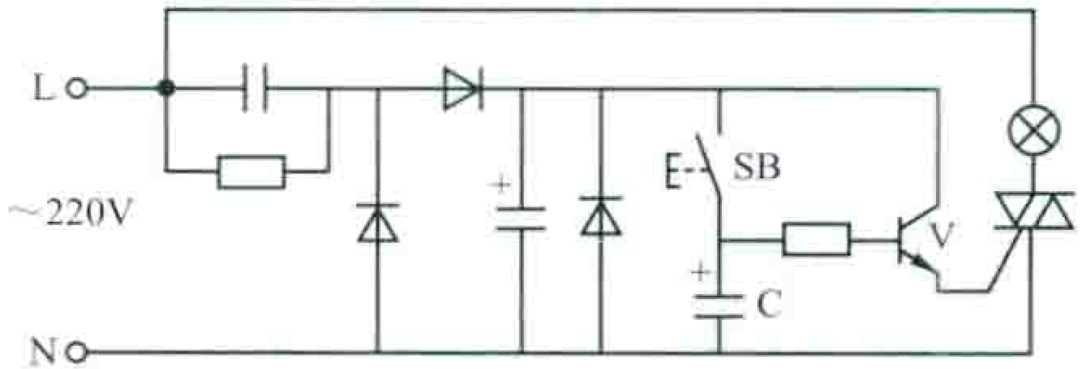


图1　按键式和轻触式定时照明控制原理

自动型延时照明开关　省去了人为操作，同时消除了因众人操纵开关而引起的病菌传染。当人进入这种开关控制区域时，光源便自动点亮，延时后自动熄灭。这种开关一般由传感器、信号放大器、延时控制器和控制开关四部分组成。自动型延时照明开关增加了光敏传感器件并配以相应的电子线路，以避免在白天或光亮较高的环境点亮光源。开关种类可以不同的传感信号进行区分，有声波遥控、红外线辐射、微波探测式和电容感应式几种。

时序照明控制　按一定时间间隔，顺序自动地开启和关闭光源。这种控制方式多用于需要定时自动开关光源的场所，如道路、广场、厂矿车间、庭院等。人们还利用时序控制原理制造出了许多节日流水灯链，用作节日装饰、广告宣传、烘托舞台气氛的装饰性灯具。

时序照明控制由脉冲信号发生器、脉冲分配器、开关控制器等组成，其时间间隔由脉冲信号发生器决定，开关的顺序由脉冲分配器来控制，如图2所示。

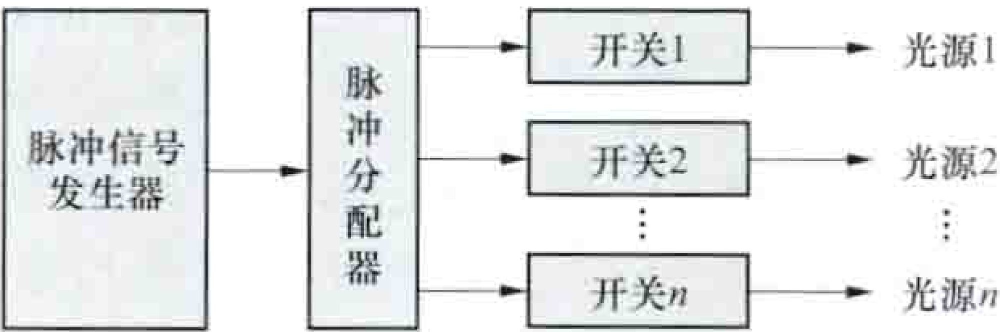


图2　时序照明控制框图

交通路口的红绿灯控制仪是一种典型的时序照明控制系统，它可以按人为规定好的时间间隔，自动开启和关闭指挥灯，并可以根据需要随时进行开关时间和间隔调整，代替了

繁重的人工劳动，并大大提高了交通指挥的准确性，已在交通工程中得到广泛应用。

程序照明控制 主要由微电脑和其他照明控制设备组成。它的控制方式是按事先安排好的程序来控制各种不同的照明状态。程序照明控制在舞台、大型体育场馆以及大型灯光表演场所有广泛应用。

简化的多功能程序照明控制系统已在道路、港口、铁路、厂矿、广场、立交桥等大面积照明场所得到了广泛的应用。该系统一般由主机、光传感器、模数转换器、驱动系统以及显示器等组成。可对室外照明灯的开关进行实时自动控制，既能跟踪每天日出和日落的时间变化，又能自动显示环境照度的变化，同时可自动记录每天的开关灯时间，用于对用电时间及数量的核算和管理。同时还具有全夜灯、半夜灯、亮度调节、停电处理、报警指示、备用电源的切换等功能。

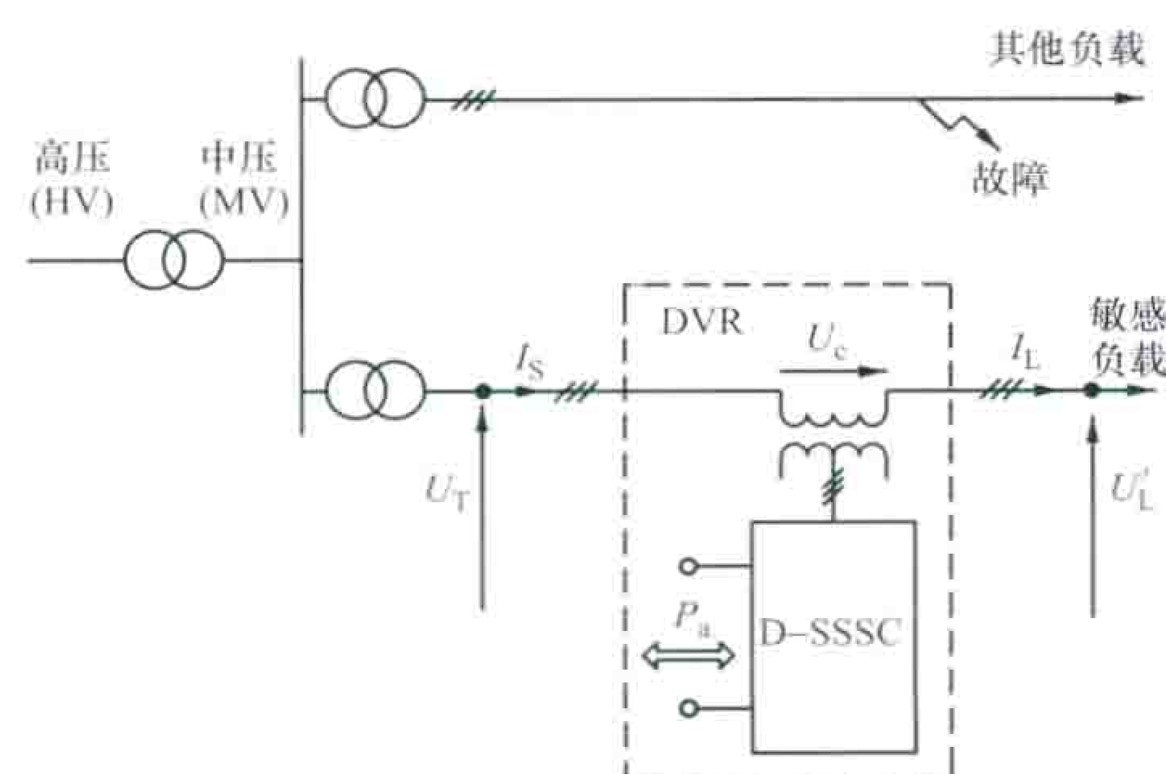
发展与展望 定时照明控制是基于钟表技术的发展而形成的。由于钟表技术起步很早，发展很快，带动了定时照明控制技术的相应提高。尤其 20 世纪 90 年代以来，电子钟表、时钟脉冲集成电路、单片机、计算机的出现，为复杂的定时照明控制创造了条件。随着计算机工业和电子技术的发展以及人们生活水平的提高，高智能化的具有辅助决策功能的大中型计算机照明管理与自控网络系统将会得到进一步的发展与应用。

dongtai dianya huifuqi

动态电压恢复器 (dynamic voltage restorer，DVR)

一种串联在配电网络上，通过插入相应幅值和频率的电压，以补偿电源侧电压扰动的补偿装置。动态电压恢复器是一种基于电力电子变流器的动态静止同步串联补偿器（D-SSSC），可以补偿电压暂降和暂升、不对称或畸变，将负载侧电压恢复到期望的幅值与波形。

原理和特点 DVR 主要由直流储能电路、脉宽调制（PWM）功率逆变器和串接在配电线路中的变压器组成。当配电网发生电压暂降、不对称或波形畸变时，DVR 辨识并计算出需要补偿的包含正序、负序和高次谐波的瞬时电压量，通过 PWM 控制由直流电源逆变出交流电压，通过串接变压器叠加到配电系统供电端，补偿相应的工频电压并抵消高次谐波，使负载上的电压幅值和波形维持在合格的范围内，直至系统电压恢复到正常值。与静止同步补偿器（D-STATCOM）相比，DVR 是一种串联补偿装置，能够实现电压暂降的补偿，可以用于中低压配电网，保护敏感用电设备免受供电系统故障期间电压暂降的危害，其运行原理如图所示。这种补偿方式仅补偿电压的差值，需要的补偿容量小，且具有补偿效果与系统阻抗、负荷功率因数无关等优点。DVR 对恢复后的负荷侧电压可以采取暂降前控制策略、同相位策略和最小能量策略 3 种控制策略。①暂降前控制策略。保证恢复后的负载侧电压与电压暂降前同相，适用于负载对供电电压相角特别敏感的场合，如采用晶闸管变流器的应用场合。由于所插入的电压幅值很大，需要 DVR 能够注入很大的有功功率 P_a。②同相位策略。保证恢复后负载侧电压与暂降期间的供电端电压同相位，如果供电端电压的幅值发生扰动，DVR 将产生与跌落值相同的电压，所插入的电压幅值为各策略中最小，对于既有的电流和供电端电压，所需的 DVR 额定视在功率是最小的，这是最常用的控制策略。③最小能量策略。由于能量存储系统的容量限制，当注入的有功功率 P_a 成为关键因素时，则采用注入能量最小的控制策略，可以按照 DVR 补偿功率 $P_a=0$ 或者 $dP_a/d\alpha=0$（α 为补偿电压 U_c 与负荷电流 I_L 之间的相位角）的条件来确定恢复后电压的相角，当受到能量存储系统限制，可以采用这种策略使得所需的 DVR 有功功率最小，但在电压暂降时间段的起点和终点会发生一定程度的过电压。



动态电压恢复器运行原理图

分类与性能 分为有能量存储系统和无能量存储系统两种，前者适用于供电端电压暂降超过 40%～50% 的场合，后者适用于电压暂降较小的场合。有能量存储系统的 DVR 其储能装置可以采用储能电容（方式一）或独立的储能电池＋DC/DC 变流器（方式二）。方式一适用于电压暂降时间较短的场合，只要通过 DVR 传输到负载的能量不会使电容器的电压跌落到给定的下限值以下，就可以恢复负载侧电压；方式二适用于电压暂降时间比较长、所需能量比较大的场合，以在电压恢复过程中保持直流电压的稳定。无能量存储系统采用一个附加的并联 AC/DC 变流器（通常是二极管整流器）作 DVR 的直流电源，分为供电侧连接和负载侧连接两种方式，可以对较长时间的电压暂降进行补偿，并且减少直流储能系统投资，但存在电压跌落期间 DVR 会从系统汲取更多电流的问题，因而不适用于深度电压暂降的薄弱电网。采用供电侧连接方式，其并联 AC/DC 变流器连接在未经补偿的电压端，所需 DVR 容量较小，但其直流环节电压不能保持恒定；负荷侧连接方式则并接在补偿后的电压端，其直流环节的电压可以保护恒定，但同时存在所需 DVR 容量较大和负载会受到二极管整流器汲取非线性电流干扰的缺点。

发展概况 由于 DVR 在补偿动态电能质量的优越性，一些发达国家较早地开展了这方面的研究工作。20 世纪 90 年代以来，随着大功率电力电子器件技术以及信号处理芯片技术的发展，DVR 向大容量、高电压和快速动态响应方向发展。1996 年 8 月，世界上第一台 2MV·A 的 DVR 在美国南加州 12.47kV 的变电站投入工业应用；2000 年由 ABB 公司制造的世界上容量最大的两套 DVR（单套容量为 22.5MVA）在以色列投入运行，可以补偿单相 50%、三相 35% 的电压跌落，响应时间小于 1ms。发达国家高、低压 DVR 已经产品化、系列化，并成为纺织、半导体、食品等敏感用户改善电能质量最有效、最经济的技术手段之一。在中国，高、低压 DVR 的应用也在不断增加，低压 DVR 已经产品化，高压 DVR 的容量和国际先进水平还存在一定差距。

参考书目

Strzelecki R，Benysek G，等．智能电网中的电力电子技术．徐政，译．北京：机械工业出版社，2010.

dugui tielu

独轨铁路 (monorail) 车辆（见电动车组）在一根导轨上运行的城市轨道交通。独轨铁路主要架设在地面交通拥挤的地区，车辆沿架空的轨道运行，是中等运量的交通工具。它的优点：①占用土地少。因为独轨铁路轨道结构窄，且又架设在道路上方，所以可设在市区道路中间分车带上方，在市区不需要征用昂贵的土地。②运量比较大。在跨座式独轨铁路上，列车若以8辆车编组，定员可达1760人，按2.5min列车间隔运行计算，每小时运量约为42 000人。③在大坡道和小半径曲线的区段仍能发挥正常性能。这一特点可以允许独轨铁路行经复杂的地段。④建设工期短、造价低。由于独轨铁路构造简单，建造容易，所以工期较短。其造价一般只相当于地下铁道造价的1/3。⑤运输安全，能保证安全正点运行。⑥噪声低，无排气污染等公害。独轨铁路采用橡胶车轮，噪声很小；采用电力牵引，不污染环境。⑦乘坐舒适。由于采用橡胶车轮和空气弹簧转向架，所以列车运行平稳，旅客乘坐舒适。独轨铁路适于在大中城市用作通勤线、连接机场和铁路车站的集散线、市中心到郊区的支线等。

分类 独轨铁路按车辆的行车状态可分为跨座式和悬挂式两大类。

跨座式独轨铁路 轨道梁一般是预应力混凝土箱形梁（在跨越河流和其他交通线路时，因梁的跨度较大，有时也采用钢制的轨道梁），车辆在轨道梁上运行。这种独轨铁路的车辆有动轮和导轮。动轮以轨道梁顶面为走行面，导轮以轨道梁的两侧面为走行面。动轮承载车体，导轮用于保持车体稳定和导向（见图1）。跨座式独轨铁路和车辆以阿尔维格（ALWEG）型为代表，是瑞典企业家A.L.维格伦于1951年委托联邦德国工程师研制，并因此而得名。日本的独轨铁道协会已按阿尔维格型进行了跨座式城市独轨铁路的标准设计。

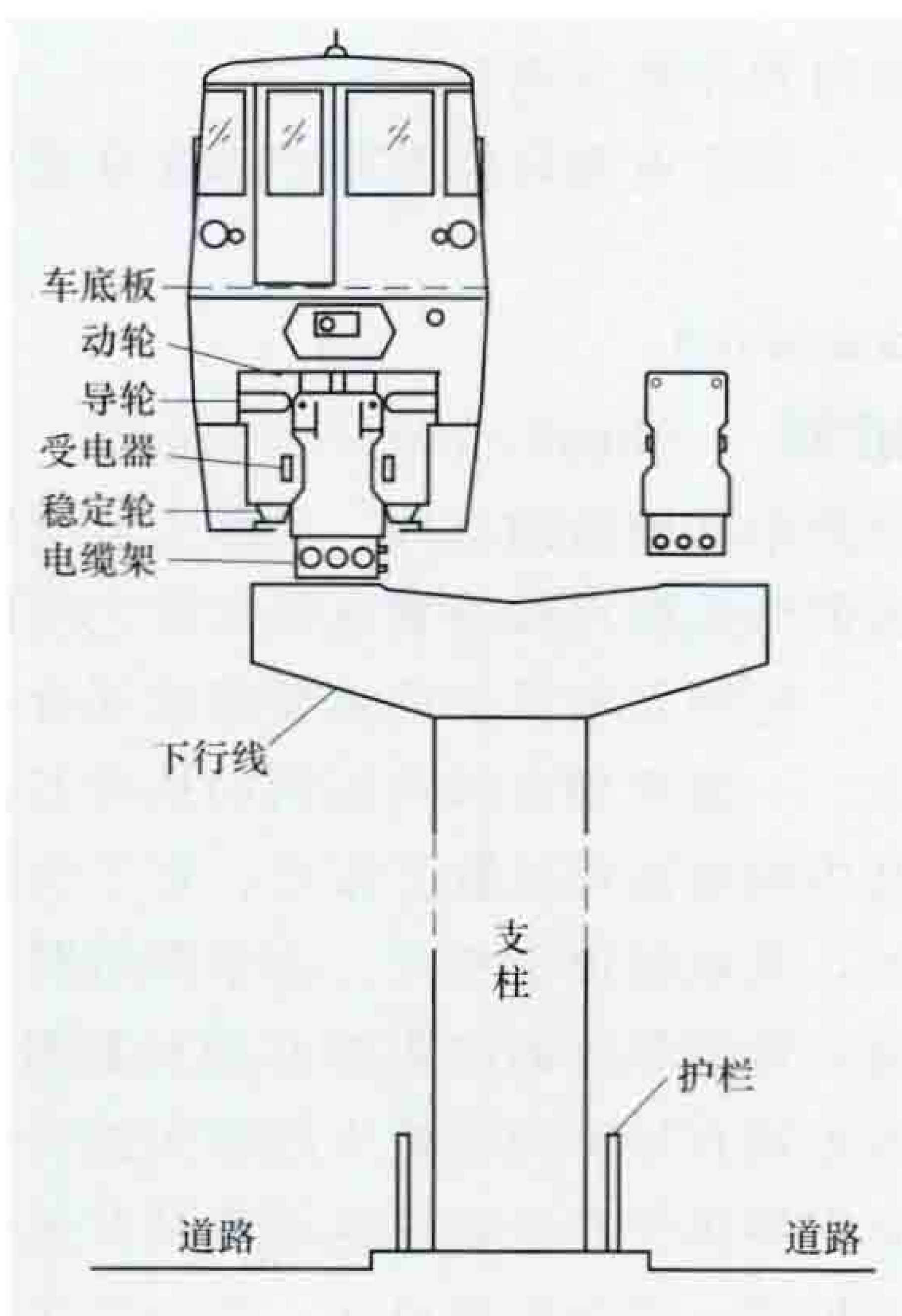


图1 阿尔维格型独轨铁路的轨道和车辆结构

重庆轻轨较新线（见图2）是中国第一条采用高架跨座式独轨铁路的线路，是中国第一次引进的中运量胶轮轻轨系统，具有转弯半径小、爬坡能力强、噪声低、无环境污染、适应山城特殊地形的特点。线路始于较场口、止于新山村，正线全长18.511km，于2006年7月1日全线开通。供电系统采用110/10kV两级集中供电方式，分别在大溪沟站（龙家湾）和动物园站附近设2座主变电所，中压环网供电系统采用10kV牵引动力照明混合网络和短串环接的双环网形式，牵引供电系统采用直流1500V刚性接触网正极供电、刚性接触网负极回流的供电方式，全线共设7座牵引变电所。



图2 重庆轻轨较新线（中国第一条高架跨座式独轨铁路）

悬挂式独轨铁路 轨道梁由一定跨距的钢支柱或钢筋混凝土支柱架在空中，车辆悬挂在轨道梁下运行。运行的车辆有非对称式和对称式两种。

非对称式的车辆有吊钩，吊钩上有钢制车轮，车轮在铺设于轨道梁上的单根钢轨上运行。这种形式的独轨铁路称朗根型（见图3）。德国伍珀塔尔市的独轨铁路即属朗根型。这条独轨铁路的大部分线路架设在河流上空，在沿河两岸架设人字形钢架，钢架上设轨道梁。这条独轨铁路于1901年建成，1903年延长，全长13.3km，车站20个，最陡坡度4.5%，每列车由两辆车编组（每辆载80人，车辆长12.2m），最高速度为60km/h。

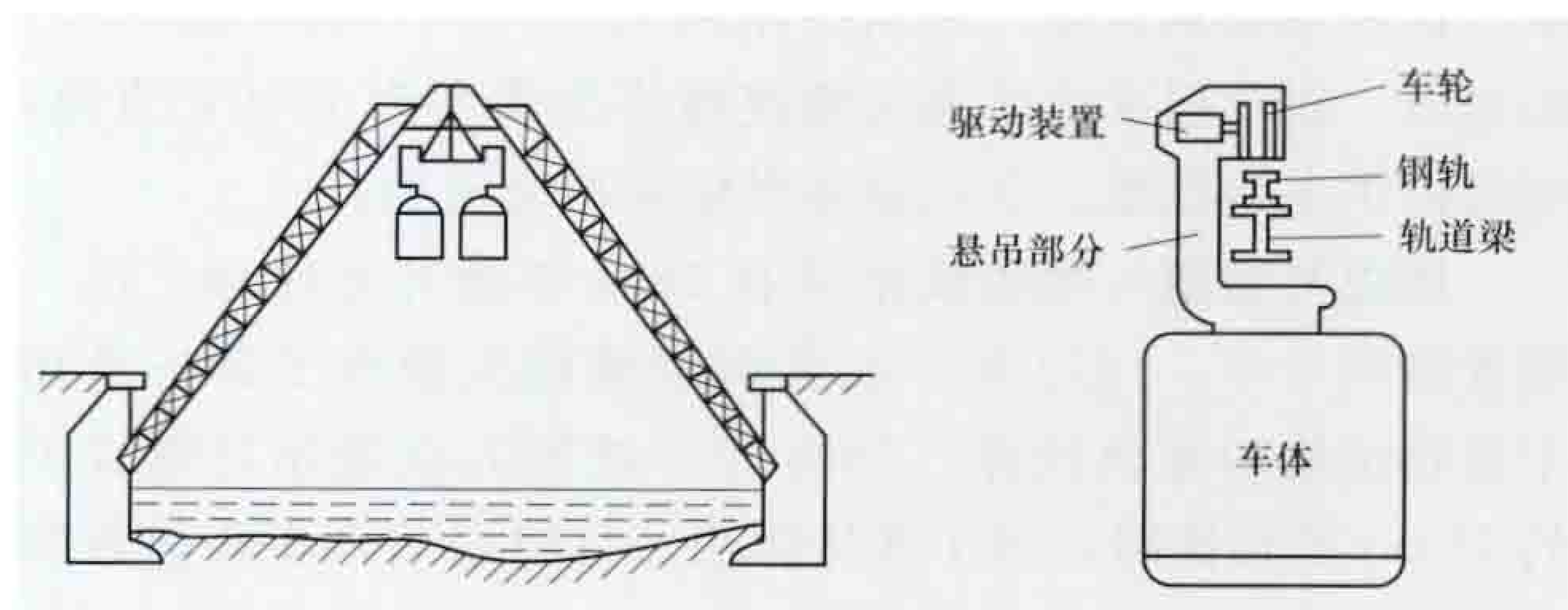


图3 朗根型独轨铁路的轨道和车辆

对称式的车辆以一对橡胶车轮在轨道梁上的走行板上运行，轨道梁为箱形，悬挂于支柱的伸臂板下方。对称式独轨铁路和车辆以SAFEGE型为代表（见图4），是法国企业管理研究公司研制的。日本独轨协会也将此独轨铁路作为悬挂式城市独轨铁路的标准设计。

结构 独轨铁路的轨道和车辆结构与普通铁路的轨道和车辆结构有很大差别。但是独轨铁路的最新控制系统和先进的安全措施与现代化铁路有许多相似之处。独轨铁路由车辆、轨道、车站、控制和信号系统、通信设备和供电系统组成。

车辆 列车一般由4～8辆车组成，前后两端的动车设司机室，通常采用600、750V或1500V直流牵引。车体由轻合金制成，尺寸与铁路车辆基本相似。车体底部为二轴转向架，转向架由走行轮、导向轮和稳定轮组成。列车通过转向架上安装的牵引电动机驱动。

轨道　轨道采用高架方式。轨道梁采用预应力混凝土，支柱采用钢筋混凝土。为保证尺寸的准确性，轨道梁用专用模具制作。在采用大跨度和高支柱结构时，也用钢制轨道梁和支柱。独轨铁路的道岔是有一定长度的关节可动式轨道梁，电动控制。轨道梁的两侧各装一根供电轨，通过装在转向架上的受电器向列车供电。

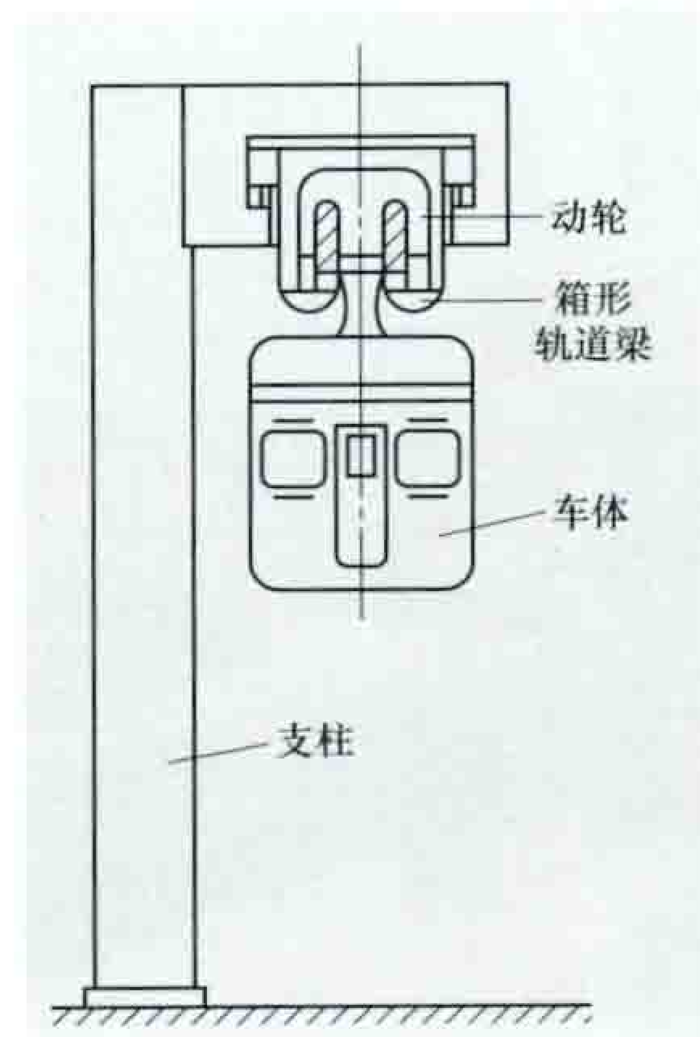


图 4　SAFEGE 型独轨铁路和车辆

车站　根据独轨铁路的特点，所有车站基本上都建成高架式，站间距一般为 0.5～1km，站台形式分岛式和侧式两种，其宽度和长度根据需要而定。

控制和信号系统　独轨铁路的车辆采用橡胶充气轮胎，所以不能像铁路那样采用轨道作为电路，因此装设列车探测装置，以探测列车占用的区间，通过行车速度自动控制系统确保行车安全。调度集中装置也是城市独轨铁路必不可少的设备。在行车间隔小、列车密度高的线路上装设列车自动运行装置，以减轻司机的劳动强度，并能均衡地高质量地组织列车运行。

通信设备　与传统铁路一样，在车站装有与调度员联系用的电话，列车上装有无线电话和为监视、引导旅客乘降的监视器以及自动播音设备。

供电系统　独轨铁路的轨道上方不设馈电线，牵引变电所的距离必须适当。为了保障供电，基本上采用双供电系统。这种系统从发电厂供给变电所 6.6、10、22kV 或 35kV 的电压，在牵引变电所通过整流器将交流变为 1500V 直流，继续向供电轨供电。车站设备供电采用交流电。

历史与展望　独轨铁路早在 1821 年就开始应用，比一般铁路早 4 年。1820 年，在英国伦敦码头铺设了第一条用于货物运输的独轨铁路。1888 年，法国人在爱尔兰铺设了约 15km 独轨铁路，用于客货运输。自此以蒸汽驱动的跨座式独轨铁路开始走向实用化阶段。这条铁路运行了 36 年，直到 1924 年停用。

1901 年，德国人在伍珀塔尔市建造了一条 13.3km 的独轨铁路，10km 线路跨河架设，其余架设在公路上方，是一条悬挂式独轨，采用 600V 直流电力牵引。该线从 1901 年通车运行至今，是世界上营业线中最古老的独轨铁路。

第二次世界大战后，独轨铁路的技术逐渐成熟，走行轨道由钢制过渡到混凝土制，车轮由钢轮改为橡胶充气轮胎，进一步降低了噪声，提高了黏着力。车轮结构和通信信号设备也不断现代化。20 世纪 50 年代以来，在美国、日本、德国、苏联、澳大利亚等国共建造了 20 多条独轨铁路，大都是短距离的游览线或试验线。

1964 年，东京独轨公司经营的东京羽田线（市中心—羽田国际机场）开始把独轨铁路作为城市公共交通的运输工具。该线营业里程为 13.0km，采用 750V 直流供电，列车由 6 辆车编组，运行速度为 48km/h，高峰时列车间隔为 4.5min，日均运量约 10.5 万人。

独轨铁路的发展相当缓慢，也有一些城市将试验或担当客运的一些独轨铁路拆除或停用。其原因，一是受有轨电车、公共汽车和小汽车等交通工具发展的影响；二是运输能力比传统铁路、地下铁道等交通工具低。20 世纪 80 年代以来，作为城市公共交通工具的独轨铁路得到较快的发展。日本从 1985 年起先后有北九州、大阪、千叶和多摩独轨铁路线延伸扩展。澳大利亚的悉尼市也于 1988 年建成一条长度约 3.6km 的独轨铁路，用于连接中心商业区和港口区。其他国家的一些城市也在计划或酝酿建设独轨铁路。

由于独轨铁路采用高架方式，应注意对日照和城市景观的影响，尤其是车站建设更应注意减小对环境的影响；噪声问题仍需要继续研究克服。独轨铁路是可供选择的交通工具之一，它将在城市交通中发挥重要作用。

duli dianyuan

独立电源

（independent power supply）　供电电源之间无任何电联系，且能够独立存在或虽有弱的电联系，但当其中一个供电电源故障而中断供电时，不会引起其他供电电源的供电功能遭受破坏的电源。电力系统中的公用发电厂、变电站以及企业自备电厂、小火电厂、小水电厂、燃气轮发电机组、柴油发电机组、蓄电池组都可作为独立电源。

电力系统提供的供电电源是否可以称作独立电源，主要取决于它们相互之间电联系的强弱程度以及用户对供电可靠性要求的高低。通常，由两个电源供电并有两台及以上变压器并列运行的变电站两段低压母线上分别提供的两个电源，也可视作独立电源。

独立电源可作为用户保安负荷的备用电源。

duanwang

短网

（heavy current line）　电弧炉主电路中低压侧电路串联设备的总称，又称大电流线路。短网指从电炉变压器的低压侧出线端到电极末端之间的大电流载流体。

短网是电弧炉的重要组成部分，短网的最大特点是电流大。一般炼钢电弧炉短网的展开长度为20～30m，然而流过其中的电流可达数万安培，对于大型矿热炉、电石炉等埋弧炉，其电流值会更大。由于在短网导体中流过如此巨大的电流，短网导体的电阻势必消耗数量可观的有功电能。同时，该电流在导体周围建立起强大的交变磁场，交变磁通必然在短网导体中产生自感电动势及互感电动势。感应电动势一方面抵消一部分电源电压，使电弧功率降低；另一方面，由于短网导体不可避免的不对称性，使得电流沿各个导体分布不均，各导体之间以及相与相之间产生功率转移等现象，使三相电弧功率不等，造成炉内炉料熔化不均和炉衬烧损不匀、炉子生产率降低等，严重影响整个电弧炉的运行指标。由于电流大，使短网导体间存在的与电流二次方成正比的电动力很大，特别是在熔化期电流波动大，短网导体间相互吸引、排斥的冲击力很大，致使短网导体抖动，接触处容易松动，接触电阻发热使接触处氧化以至损坏，电缆摆动和相互摩擦使电缆绝缘损坏。由于短网工作环境温度高，尘埃多，使得短网导体与炉体之间的绝缘容易损坏。

短网的电参数 短网是接在电炉变压器与负载之间的导体，短网导体本身具有电阻和自感，短网导体之间具有互感，短网回路是一个具有互感的三相不对称电路。代表短网电气性能的参数是其等效电阻、等效电抗和三相阻抗不平衡系数。短网的这些电参数可通过计算求出，也可用工业短路试验的方法及模拟试验的方法求出。

短网等效电阻 除了导体本身的电阻外，还必须考虑电流的趋肤效应和邻近效应、短网导体的接触电阻以及由于短网附近存在的钢结构所引起的有功功率损耗等。短网的电阻损耗占电弧炉有功功率的7%～12%。短网等效电阻要消耗很大的有功电能，它的大小决定了电炉装置的电效率，因此应该尽量减小短网的等效电阻值。为了减小等效电阻，应尽量缩短短网的长度；选取电阻率小的无氧铜或工业纯铜作导电体；按照经济电流密度而不是按照热平衡的允许电流密度选取导线截面；尽量减小接触电阻及附加电阻；采用合理的导体排列及导体截面形状，以减小趋肤效应。接触电阻主要产生在电极夹持器导电块与电极的接触处，以及母线连接处。为了减小接触电阻，导体的连接处要有足够大的接触面积和压紧力。

短网等效电抗 导体的自感及互感取决于导体本身的长度、断面尺寸以及相互位置。由于短网导体断面形状复杂，导体根数极多，计算其自感及互感非常复杂。因此，在工程上通常按短网导体的不同形状分为几段，对于每一段导体用几何均距的方法，把每一相中流过相同方向电流的导体用一个等效导体来代替，用等效导体的自几何均距及相与相导体之间的互几何均距来计算各相导体的等效电抗。等效电抗的大小不仅取决于导体本身的几何尺寸、导体之间的相对位置，还取决于导体的接线方式，流过导体的电流频率、电流相位，此外，还与选用的等效方法有关。短网等效电抗是继电弧电阻之后对于主电路具有决定意义的参数。当电炉变压器容量一定时，减小回路电抗可以提高功率因数；但是电抗又可以使电弧连续和稳定，并减小电弧炉对电网的冲击和影响。对于小型电弧炉，应保持适当的电抗；对于中、大型电弧炉，应尽量减小短网的电抗；对于高阻抗电弧炉，由于采用长弧操作，提高了变压器二次侧电压，为了保持电弧稳定，在变压器一次侧串联了电抗器，增大了供电系统的电抗值，折算到变压器二次侧，使短网的等效电抗增大。减小短网等效电抗的措施为：尽量缩短短网长度；选择合理的短网接线和布置方案；在相同截面的情况下，适当增加导体根数，增大本相导体之间的距离以减小自感电抗；把流过反相电流的导体尽量靠近，使互感电抗与自感电抗相抵消，以减小总的等效电抗。

三相阻抗不平衡系数 衡量短网三相阻抗不平衡程度的指标，它等于三相阻抗中最大值与最小值的差值与三相阻抗算术平均值之比，以百分数表示。由于短网阻抗中感抗占主要成分，所以阻抗不平衡系数与电抗不平衡系数十分接近。通常阻抗不平衡系数应小于5%。

短网导体及接线方式 为了减小短网的电阻值和承受较大的电动力，电弧炉的短网导体常采用铜材。电极横臂上的导电体采用铜管，或采用导电横臂。短网中有一段可挠软电缆，常采用大截面水内冷电缆。电炉变压器室的出墙导电体常采用铜排或铜管。为防止铜排或铜管把膨胀力和振动力传给变压器二次出线，影响出线处密封，二者之间的连接均采用补偿器。

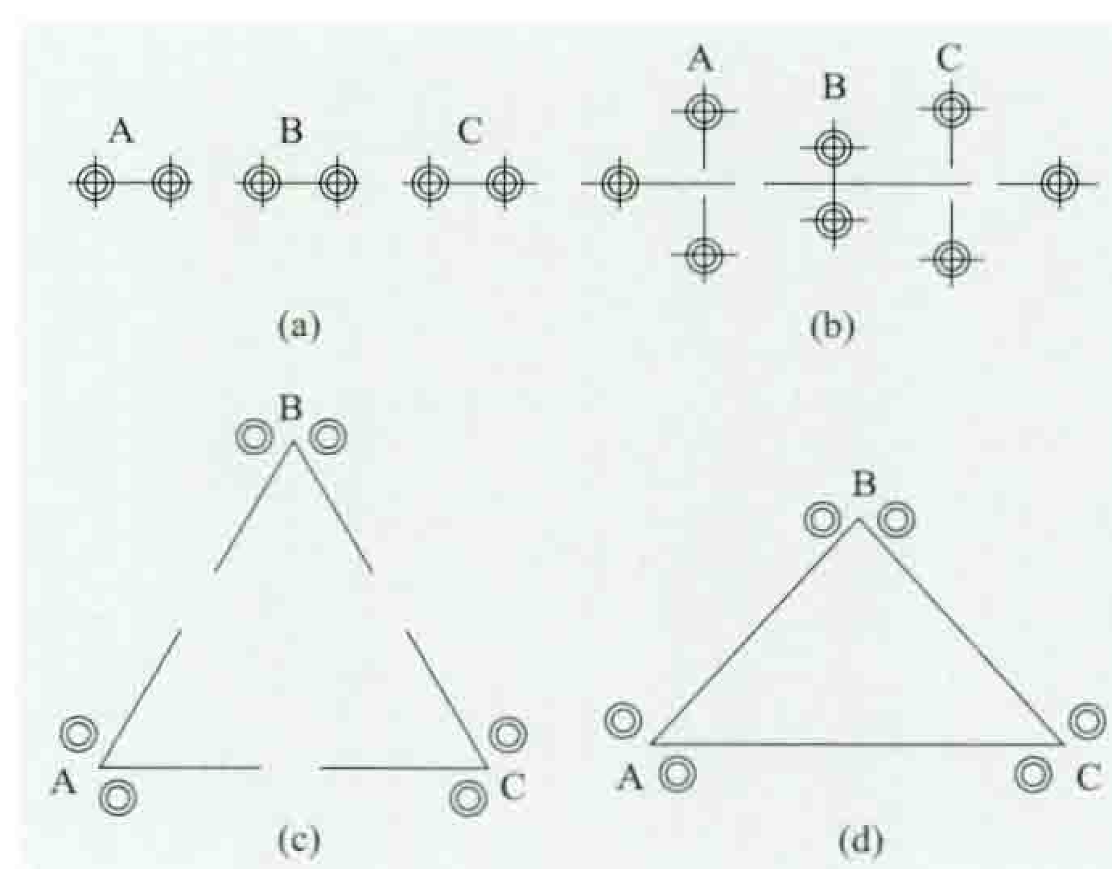
为了减小短网电阻，且考虑到电弧炉短网导体工作环境温度高，经常过负荷运行，其电流密度不宜选得过大，一般铜排及裸电缆电流密度选用1.5A/mm²，水冷导电铜管及水冷电缆的电流密度取3.5～4.5A/mm²。为了减小接触电阻，除了保证接触导体间有足够的压力外，还应注意必须有足够的接触面积，对于铜排及裸导体连接，其接触面的允许电流密度应不大于0.15A/mm²；对于水冷导体之间的连接，其接触面的电流密度应不大于0.5A/mm²。

短网导体的接线方式主要指电炉变压器低压绕组的头和尾在短网的哪一段上封口接成三角形。封口点可以在电炉变压器内部，也可以在电炉变压器的外部即短网的某一段上封口。在三角形封口点之前，流过导体的电流为相电流，相邻导体间的电流相位差可以是180°，也可能是120°或60°。为了减小电抗，要让相位差180°或120°的导体尽量靠近，要让同相位或相位差60°的导体拉开距离。埋弧炉大多采用相位差180°、电流相反的导体相互靠近的双线制布置短网。三相炼钢电弧炉一般取在铜排末端封口接成三角形，或在电炉变压器内部封口接成三角形。实际中更趋向于采用后者，尤其是对于大型电弧炉，电炉变压器采用内封口、侧面铜管出线，这样各相短网直接与电炉变压器输出端相连，不再需要跨接铜排或弯曲铜管，大大简化了短网结构。

短网的空间布置 主要有普通平面布置、正三角形布置、修正平面布置、修正三角形布置4种，如图所示。后三种方案各有优缺点，在电弧炉中得到了广泛的应用。由于受厂房高度及电弧炉与电炉变压器中心距的限制，对于旧炉短网改造，多采用修正平面布置或修正三角形布置。

普通平面布置 如图（a）所示，这种短网结构简单，但三相电抗严重不平衡。经实测，三相电抗不平衡系数在30%～40%之间。

正三角形布置 如图（c）所示，三相导体的数量及间距、几何布置相同，但三相导体的断面几何中心位于正三角形的三个顶点上。这时三相电抗完全相等，但要注意端部的不对称，如处理得当，可使三相电抗不平衡系数小于5%。这种布置对于图（b）、图（d）所示布置而言，结构简单，容易实现，电抗容易平衡；缺点是增加了炉子与电炉变压器的中心距；当三相电极消耗不同，正三角形被破坏后会引起三相电抗不平衡。



短网导体空间布置图

（a）普通平面布置；（b）修正平面布置；（c）正三角形布置；（d）修正三角形布置

修正平面布置 如图（b）所示，边相导体相对于中相导体几何轴向对称，各相导体断面的几何中心位于同一平

面，但各相导体的自几何均距不同，中相导体的数量及间距减小，边相导体的数量及间距增大。这种布置形式也可以实现三相电抗平衡，使三相电抗不平衡系数小于5%，结构比正三角形布置要复杂一些。

修正三角形布置　如图（d）所示，这种布置是将正三角形布置与修正平面布置相结合，三相导体的断面几何中心位于一个锐角三角形的三个顶点上，各相导体的数量相同，中间导体的间距缩小，边相导体的间距增大。这种布置同样可以使三相电抗平衡，并使电弧炉与电炉变压器中心距及电弧炉高度增加较小。

短网的组成　主要有大截面水冷电缆、新型补偿器、导电横臂等。

大截面水冷电缆　将多股300～500mm^{2}的铜绞线电缆通过接头压接成一根，每根电缆截面积为1200～6000mm^2，每相一般只用2～4根电缆，每台电炉6～12根电缆，使短网的布置和结构大大简化。由于每根电缆中的铜绞线经过几何换位，使铜绞线的电流均匀；铜绞线之间有绝缘隔开，相互位置被固定；整根电缆之间位置拉开，并且受重力的影响，不再相互摩擦；铜绞线与铜接头压接成一体，铜接头面积大，而且是加工面，接触面接触好；电缆及接头均通水冷却，冷却效果好。大截面水冷电缆大大提高了运行可靠性。另外，由于电缆束之间位置固定，使电抗值变化小，对电弧稳定也有好处。

新型补偿器　补偿器是连接变压器与导电铜管的重要组件，新型补偿器有水内冷补偿器、干式铜皮补偿器、干式软缆补偿器。①水内冷补偿器。它与大截面水冷电缆类似，把多股铜绞线组成圆篓状，两端与铜接头压成一体。这种补偿器既通水又导电，直接将两边的电路和水路相连。②干式铜皮补偿器。这种补偿器只导电，水路由另外的橡胶管连接。③干式软缆补偿器。这种补偿器是用多股铜绞线，两端分别与两个铜接头压成一体构成。其优点是在任意方向都有挠性，对两端被连接物的位置尺寸要求不高，安装方便。

导电横臂　有铜钢复合导电横臂和铝合金导电横臂。前者得到广泛应用，后者应用范围较小。

铜钢复合导电横臂的四周选用4块铜钢复合板焊接成一个横臂体，其断面为矩形。横臂体的钢板与钢板焊接，铜板与铜板焊接。横臂体内部通水冷却，电极夹头是导电横臂中比较容易损坏的部件，它的优劣在很大程度上决定了导电横臂的优劣。导电横臂的电极夹紧采用抱紧式结构，后部为导电座，前部为不锈钢抱圈。夹紧机构安装在横臂体内部，采用蝶形弹簧，依靠其张力拉紧抱圈抱紧电极，夹紧力为电极质量的10倍以上。放松电极时依靠液压缸中的活塞移动以压紧弹簧推动抱圈，使电极松开。导电横臂由于横臂体本身导电，将以往的多处绝缘取消，可靠性大为提高。导电横臂的电阻值和电抗值均比传统的导电铜管降低，节电效果明显。导电横臂的刚性也比传统的横臂好，可减少电极在升降过程中的振动；导电横臂还可缩小电极分布圆直径，从而提高炉衬寿命。

铝合金导电横臂的横臂体，其四周选用4块铝合金板焊接而成，断面为矩形。由于铝合金板质量轻，因此，其横臂体的断面尺寸可适当放大，使横臂刚度提高。铝合金横臂体的其他结构形式与铜钢复合导电横臂相似。铝合金导电横臂的质量只有铜钢复合导电横臂的40%左右。较轻的质量有利于提高电极升降机构的动态性能。铝合金导电横臂若在使用中出现漏水等故障，在用户现场较难解决，使其应用范围受到了限制。



faguang erjiguandeng

发光二极管灯 (lighting emitting diode, LED) 利用固体半导体芯片作为发光材料，在半导体中通过载流子发生复合放出过剩的能量而引起光子发射，直接把电转化为光的器件。LED被称为第四代照明光源或绿色光源，具有节能、环保、寿命长、体积小等特点，可以广泛应用于各种指示、显示、装饰、背光源、普通照明和城市夜景等领域。

工作原理　半导体晶片由两部分组成，一部分是P型半导体，在它里面空穴占主导地位；另一部分是N型半导体，其内主要是电子。当这两种半导体连接起来时，P型半导体里面的空穴就会飘向N区，与那里的自由电子结合；同样N型半导体里面的电子也会飘向P区，与空穴结合。这样，P区失去空穴而带负电，N区失去电子而带正电，形成一个静电场，阻碍了电子和空穴的飘移，它们之间就形成一个"P-N结"。当电流作用于这个晶片时，电子会被推向P区，在P区电子跟空穴复合，以光子的形式发出能量，这就是LED发光的原理。光的波长是由形成P-N结的材料决定的。

作为照明光源使用的LED的主流是高亮度的白光LED，分为图1所示的3种类型。图1（a）所示是已商品化的白光LED，多是二波长，即以蓝光LED加上黄色荧光粉混合产生白光，其结构见图2。图1（b）所示是未来较被看好的三波长白光LED，即以无机紫外光LED加红、蓝、绿三基色荧光粉混合产生白光，它将取代荧光灯、紧凑型节能荧光灯及LED背光源等光源。图1（c）所示是利用红绿蓝三个单色的LED混合形成白光，并可随时调节成各种颜色光，多用于灯光秀、舞台照明、演播室照明等场合，但由于成本较高，很难在一般应用场合推广。

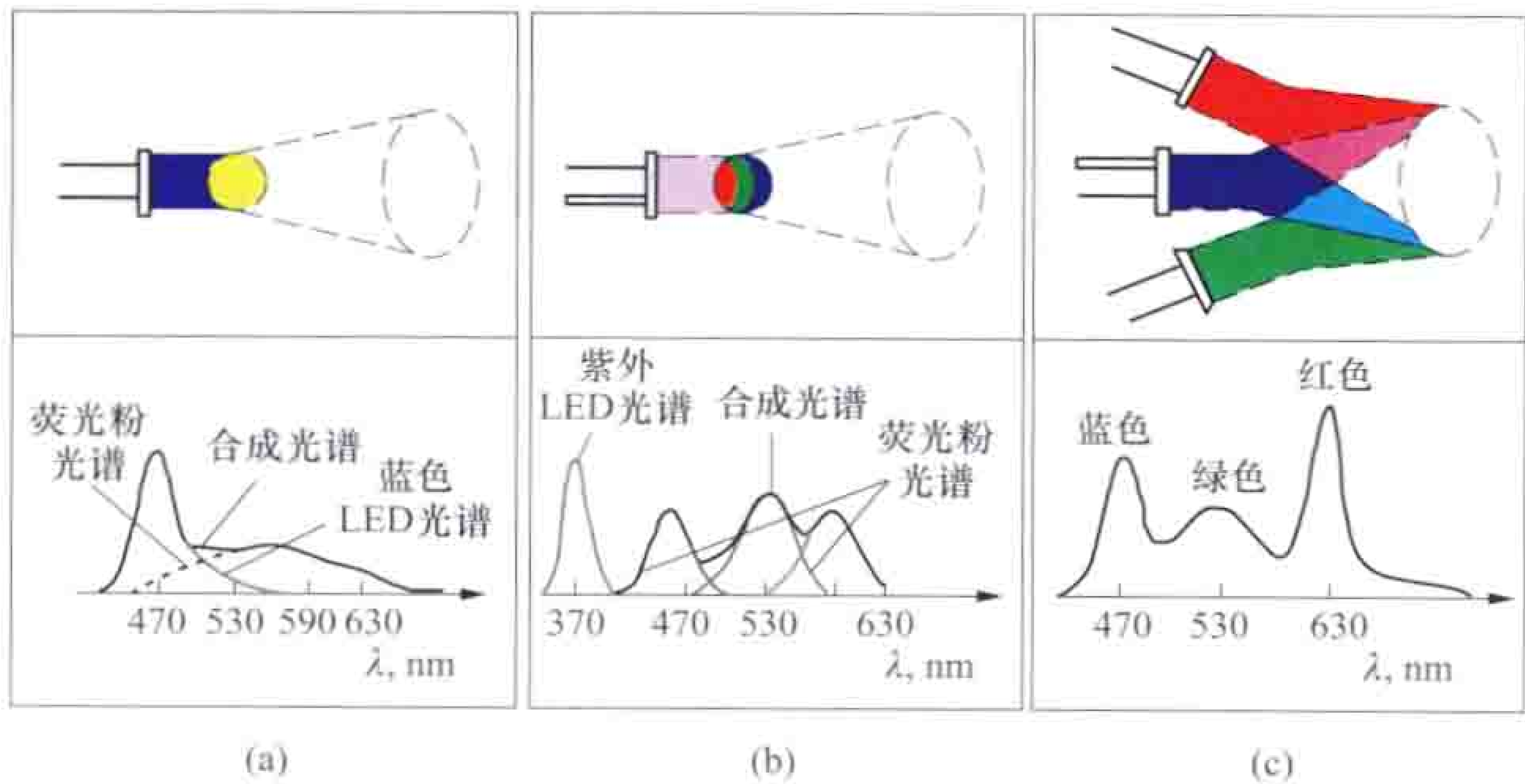


图1　白光的形成方式及其光谱构成示意图
(a) 蓝光LED+黄色荧光粉；(b) 紫外光LED+三基色荧光粉；(c) 蓝光LED+红色LED+绿色LED

由于发光二极管是特性敏感的半导体器件，又具有负温度特性，因而在应用过程中需要对其进行稳定工作状态和保护。发光二极管器件对驱动电源的要求近乎苛刻，不同用途的LED，要配备不同的电源适配器。由于发光二极管的压降很小，在电源电压产生波动时会导致流过LED的电流剧烈变化，瞬时浪涌电压甚至可能导致其直接烧坏，因此驱动电路的一个重要环节就是要防止或限制电压波动或浪涌电压。

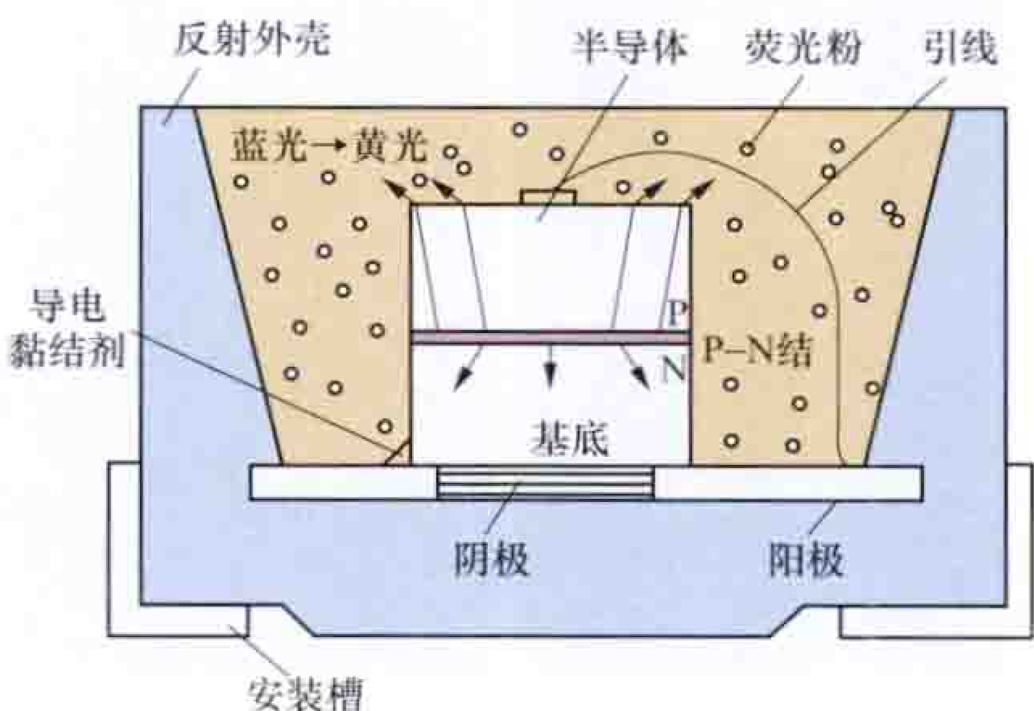


图2　基于蓝光LED的白光LED芯片结构

特性　LED与白炽灯、荧光灯等传统光源有着较大的区别，主要包括：①发光特性不同。传统光源都是球形全方向发光，而LED是单向发光。LED不借助灯具就能够形成合理的配光，避免了灯具产生的折射和反射损失。②发光原理不同。传统光源绝大部分是依靠电流加热灯丝或电极释放电子流形成发光过程，而LED是通过电子和空穴复合直接发出光线。不仅发热量小，而且可以瞬间达到额定亮度且反复点灭不影响其寿命。③LED是断续光谱，基本不包括红外线和紫外线，这用于某些场所（如博物馆、美术馆）是非常适宜的，但缺少红外线的光照对长时间视觉工作有较大的不利影响。④LED是固体发光器件，结构内也没有松动的部分且被完全封装在环氧树脂里面，抗震性和抗冲击性能极高，适用于各种场所。⑤LED体积小、发热量低、使用安全电压，可以与各种建筑装修材料和各种家具组合，构成丰富多彩的光环境效果。⑥LED由无毒的材料构成，不像大多数气体放电光源由于含汞会造成化学污染。⑦直流驱动有效地降低了频闪深度，对缓解视觉疲劳有一定的作用；但其断续光谱和含量明显偏高的蓝光成分对人眼会产生一定的不利作用，还有可能引起不同程度的生理周期紊乱。⑧LED的发光效率已接近或超过最高效的传统光源，具有较大的节能优势；由于表面亮度很高，易产生眩光和光辐射伤害。

LED的光通量与温度成反比，85℃时的光通量是25℃时的一半，而−40℃时的光输出是25℃时的1.8倍。温度的变化对LED的波长也有一定的影响，良好的散热是LED保持恒定亮度的保证。

应用与发展　LED在景观照明、室外照明、商业照明等领域相对于传统光源来说具有较大的优势。但在办公照明、工业照明等长时间精细视觉工作的场所，由于LED在光谱特性上的不足还要慎重对待；在体育照明、会展照明等大功率光源的应用场所要替代传统光源还有较大差距。图3所示为2011年西安世园会长安塔LED夜景照明。

LED的优势在于小体积和高可控性。将不同色温的发光二极管芯片组合在灯具内，通过控制系统调节这些芯片的光输出比，就可以获得随设定条件自动改变色温和光强度的照明器，这对于传统光源来说是极其困难的。另外，在地下车库，建筑物的走道、楼梯间等几乎无人滞留的场所，采用



图 3 西安世园会长安塔 LED 夜景照明

智能探测技术做到人来灯亮、人走灯灭，是节约能源的重要措施。

LED 在农业生产中也有较大的应用前景。蓝色光谱会有效提高植物干细胞的形成，橙红色光谱可以大大促进植物枝叶的生长。由于 LED 具备灵活性高、光谱纯度高、可以精细控制等特点，可以根据农作物的不同生长阶段提供最佳的补充光照方案，增加农作物产量。

随着 LED 的飞速发展，另一种利用半导体特性发光的薄膜器件——有机发光二极管（organic light emitting diode，OLED）也在研发中，并显示出光明的应用前景。

OLED 的基本结构是由薄而透明且具半导体特性的铟锡氧化物与阳极相连，另一侧为金属阴极，包成如“三明治”的结构。如图 4 所示，结构层中包括空穴传输层、有机发光层与电子传输层。OLED 的发光原理和 LED 相似。当元件受到直流电所衍生的顺向偏压时，外加电压能量将驱动电子与空穴分别由阴极与阳极注入元件，当两者在传导中相遇、结合，即形成所谓的电子-空穴复合。当电子的状态位置由高能态回到低能态时，其能量将分别以光子或热能的方式放出，金属电极膜同时也起了反射层的作用。根据这种发光原理制成的显示器称为有机发光显示器，也叫 OLED 显示器。可以选择适当的材料作发光层或是在发光层中掺杂染料以得到所需的光色。

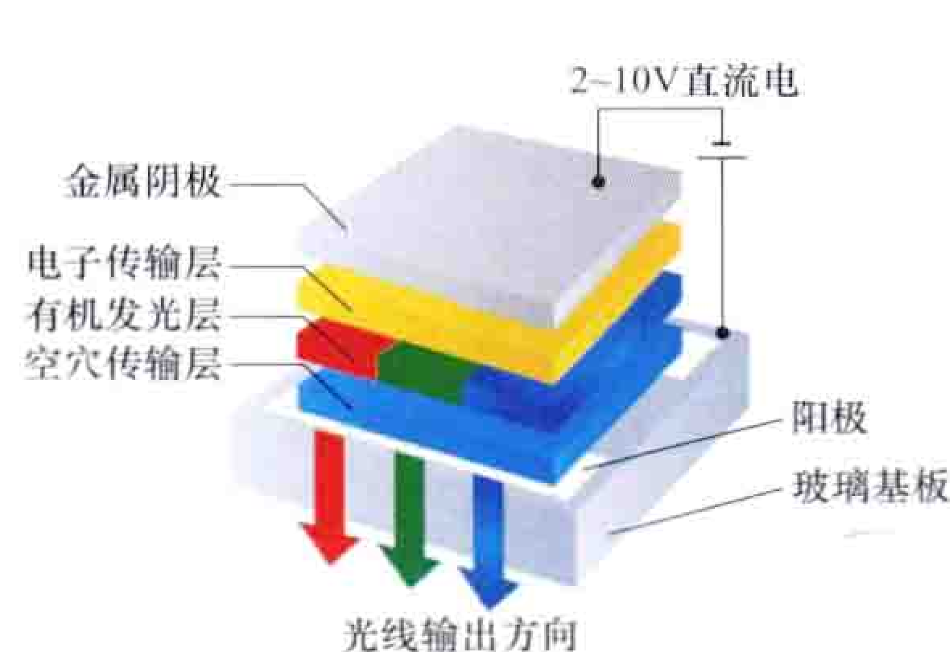


图 4 有机发光二极管发光原理示意图

OLED 不仅可以用于显示器使用，还可作为照明光源使用，并具有功耗小、厚度薄、显色性高、响应速度快、表面亮度低、寿命长等优点。由于生产工艺尚不成熟，很难开发出较大面积（0.06m² 以上）的商用器件且成本不菲，影响了应用技术的推广。图 5 所示为 2012 法兰克福照明展会上展出的 OLED 落地灯。



图 5 OLED 落地灯（在 2012 法兰克福照明展会上展出）

faguang qiangdu

发光强度 （luminous intensity） 点光源在给定方向上立体角元内所发射的光通量与该立体角元之商，以符号 I 表示，即 $I=\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}\Omega$，发光强度的单位是坎德拉（cd）。按照数学定义，立体角一定有一个锥顶点，因此，严格地说，发光强度的定义只适用于点光源。但是，在实际应用中，点光源是一个相对概念，当光源的线尺寸远小于观察它的距离（$<l/10$）时，即可视为点光源。

在电灯没有发明以前，人们用一种鲸鱼油制成的烛来照明。每支烛的大小、质量都要按照统一的标准制作，把它燃烧发出的光的强度叫 1 烛光。电灯发明以后，仍然沿用烛光这个单位来表示电灯的发光强度。它的表达方法是：当一只电灯发光的强度是鲸鱼油烛的 5 倍时就叫 5 烛光，以此类推。虽然已不再用鲸鱼油制成的烛照明，但是有些国家的灯泡厂所生产的灯泡，仍然采用烛光这个单位表示发光强度。

点光源在 1sr（球面度）立体角内发射 1lm 光通量时，此方向的发光强度为 1cd。坎德拉是国际单位制中 7 个基本单位之一，其他光度量的单位都是由它导出的。1979 年 10 月第十届国际计量大会通过的新定义是：坎德拉是一个光源在给定方向上的发光强度，该光源发出的单色辐射频率为 540×10^{12} Hz，且在此方向上的辐射强度为 1/683W/sr。

发光强度表征光源发射的光通量在空间的分布状况。在照明工程中，光源或照明灯具的光强分布曲线（亦称配光曲线）或等光强图是进行照度计算和设计的重要资料。

Faladi dianjie dinglü

法拉第电解定律 （Faraday's law of electrolysis） 反映通入电解质溶液中的电量与析出物质的量之间关系的规律。该定律是 M. 法拉第（Michael Faraday，1791—1867）在归纳大量实验结果的基础上，于 1833 年总结的，含法拉第第一定律和法拉第第二定律。



M. 法拉第

法拉第第一定律 电解过程中，任一电极上发生化学变化的物质的质量 m 与通过电解质溶液的电量 Q 成正比，即与电流强度 I 和时间 t 成正比。其表达式为

$$m=KQ=KIt \qquad (1)$$

式中 m 为电极上生成物的质量，g；I 为电流强度，A；t 为时间，h；K 为电化当量，g/（A·h）。

法拉第第二定律 将同量的电通过不同的电解质时，电极上生成物质的量与其化学当量成正比。其表达式为

$$m=\frac{N}{F}It \qquad (2)$$

式中 N 表示物质的化学当量，为元素原子量除以原子价的值。即电极上发生 1g 当量（为物质的量除以化合价的值）的任何物质的变化，通过的电量都是 96 490 C。因此，96 490 C 是电化学的一个基本常数，称为法拉第常数，以 F 表示。

fangudao baohu

反孤岛保护 (anti-islanding protection) 防止分布式电源并网发电系统非计划持续孤岛运行的继电保护措施，又称孤岛保护、防孤岛保护、脱离主网保护（loss of mains protection，LOM）。该保护在检测出含分布式电源的配电系统出现孤岛运行状态后，及时将分布式电源发电装置与电网解列。

孤岛检测方法按照信号来源可分为本地检测方法和远程检测方法，按照是否有主动激励可以分为被动式检测方法和主动式检测方法两类，如下所示：



被动式孤岛检测方法　通过直接检测分布式电源发电装置并网点处的电压、频率、相位或功率方向的变化判断是否出现孤岛运行状态的一类方法。具体采用的检测原理包括过电压、欠电压、电压相位偏移、过频率、欠频率与逆功率等。被动式孤岛检测方法具有原理简单、容易实现、对电能质量无影响等优点。但是，每种方法都有较大的检测盲区（又称非检测区），特别是在孤岛运行时分布式电源出力和本地负荷基本匹配而其电压和频率基本维持在正常范围内的情况下。

主动式孤岛检测方法　在并网逆变器的控制信号中加入很小的电压、频率或相位扰动信号，通过检测逆变器的输出（包括频率、电压、有功功率、无功功率、等值阻抗等）来判断是否出现孤岛运行状态的一类方法。当逆变器与主电网相连时扰动信号的作用很小，而当孤岛运行时扰动信号的作用就会显现出来，当逆变器输出变化超过规定的阈值时就能检测出孤岛运行状态的发生。该方法检测精度高，检测盲区小。但是，分布式电源出力本身存在的随机波动性会影响判断，人为加入扰动也会降低逆变系统的效率，影响电能质量，且该类方法控制算法复杂，有待进一步改进。

远程检测方法　借助通信手段实现孤岛检测的方法，如断路器状态监测法和电力线载波信号监测法。断路器状态监测法的基本思想是监视电网中所有可能导致孤岛形成的断路器或自动开关的状态，当其中一个跳闸时，中央控制单元将确定孤岛区域，并立即发送信号中止孤岛区域内分布式电源发电装置的运行，在故障清除后，还可以用同一个中央控制单元提供分布式电源发电装置的重连信号。此方法成本高、执行复杂。电力线载波信号监测法是在电网侧变电站母线注入载波信号，在分布式电源发电装置侧监测该载波信号，如果载波信号消失即可确定分布式电源发电装置与主电网隔离，进入孤岛运行状态。

fangbao dianji

防爆电机 (explosion-proof motor) 在具有爆炸性气体的地方安装的结构上能够防止气体爆炸的电机。防爆电机适用于石油、化工、煤矿等有爆炸危险的场所。具有爆炸性气体或蒸气与空气的混合物的危险场所，按其危险程度分为三级。爆炸性混合物，按其自燃温度的高低分为五组，按其试验最大不传爆间隙的大小又分为四级。各类防爆电机均按其适用场所中存在的爆炸性混合物的组别与级别进行设计与制造，并在产品上标明。根据电机的安装场所、电压等级以及有无集电环或整流子等条件选取防爆结构。电机的防爆结构有隔爆型、增安型、正压型和无火花型 4 种。

隔爆型防爆电机　采用全封闭结构，其外壳有较强的机械强度，在组成外壳的各零部件之间的各结合面上具有一定的间隙，能承受内部爆炸的压力，而且不会引起外部爆炸性混合物的爆炸。电机的隔爆结合面有静止和活动两部分。静止部分包括机座与端盖、端盖与轴承、机座与接线盒、接线盒内各有关部件、连接两空腔的绝缘压制件与金属件之间以及绝缘压制件相互间的结合面。活动部分指转轴与轴孔间的结合面。

增安型防爆电机　为使正常运行时不产生火花、电弧或危险温度等，增加电机结构的强度和温升的安全系数的电机。这种结构的电机容许堵转时间不得少于 5s，最好达到 10s 以上；其绕组的允许温升限值比普通电机的相应规定降低 10K；在接线盒盖与盒座之间加设橡胶垫圈；户外使用的电机应在轴伸加装甩水环。

正压型防爆电机　其与通风装置组成一体，机体内连续通以不含爆炸性混合物的新鲜空气或充以惰性气体，以保持运行期间机内任何部位的压力都比机外大 200Pa 以上，从而阻止爆炸性混合物从外部进入电机。

无火花型防爆电机　在产品部件上采取适当措施，使电机在正常运行条件下不会点燃周围爆炸性气体混合物，且一般不会发生点燃故障。

fangjian jiareqi

房间加热器 (room heater) 将电能转换为热能，用于家庭环境下的取暖或局部提高空气温度的家用电器，俗称电暖器。电暖器一般功率较大。

分类与结构　电暖器按其主要传热方式可分为对流式和辐射式两大类。对流式又可分为自然对流式和强制对流式两种。

自然对流式电暖器　利用冷热空气的自然对流，将室内空间加热。自然对流式电暖器的壳体上方设出气口，下方设进气口，中间装电热元件（通常是电热管）。通电后，电热元件发热，其周围的空气被加热上升，从出气口流出。较冷的空气从下方进气口流入壳体，补充到电热元件周围。如此循环，使室内空气逐渐升温。当环境温度到达规定值时，控温元件自动切断电源。通过功率调节开关，可控制电热元件的接通数量，从而调节加热功率。这种电暖器的电热元件本身有基本绝缘（见家电绝缘结构），与壳体间还有一层绝缘，

因此使用较安全。

充油式电暖器是一种以自然对流为主要热交换形式的电暖器。电热管装于散热效果较好的腔体下部，腔体内装变压器油等传热介质。通电后，腔体下部电热管周围的油被加热后，升到腔体上部，通过腔体表面将热量传出去，加热周围空气。散热后冷却的油下降到腔体下部电热管周围又被加热。电暖器周围的热空气上升后，下部冷空气补充到电暖器周围，如此反复循环，使室内空间逐渐升温。这种电暖器设有温度调节器，在油温升到规定值时，自动切断电源。这种电暖器外表面温度一般不超过85℃，热安全性较好，不易烧伤人体。但其热惯性较大，升温慢，不宜经常开关。



图1 暖风机

强制对流式电暖器　也称暖风机，如图1所示，利用风机鼓动空气通过电热丝或PTC（正温度系数）电热元件，强制空气对流，进行热交换。利用电热丝加热的暖风机可装限温器，当热风出口或空气进口被堵，机内温度到达规定值时，限温器动作切断电源。使用PTC元件加热的暖风机，因PTC元件具有恒温特性，不需装限温器。

辐射式电暖器　利用电热元件热能的辐射、反射等作用，加热室内局部空间。其结构如图2所示，电热元件有电热丝、电热管和石英管等不同类型。

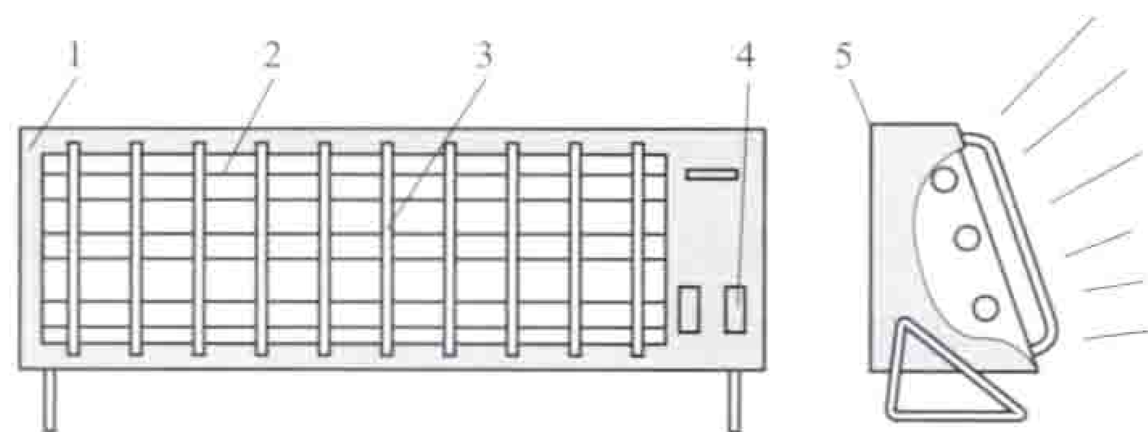


图2 辐射式电暖器结构示意图
1—外壳；2—电热元件；3—防护条；4—功率调节开关；5—反射板

辐射式石英管电暖器又称远红外线电暖器，一般装两支石英管，利用功率调节开关使其一支或两支通电工作。石英管内电热丝通电后发出可见光和近红外光，石英管吸收这些光后，产生晶格振动发射远红外线，人体和衣服对远红外线有较强的吸收特性，并很快转化为热能，达到取暖目的。

使用与维护　自然对流式电暖器对房间的加热速度慢，适合于长时间加热，其加热温度均匀，使用舒适性好，没有噪声。强制对流式电暖器通常功率都不太大，适合于较小空间取暖，温升速度快，工作时有噪声，热气流容易使空气干燥。辐射式电暖器因发出的热量有明显的方向性，适合于局部取暖，可见发光的辐射式电暖器辐射温度较高，与易燃物距离较近时容易引起着火，且容易使空气干燥，使用舒适性偏差。充油式电暖器比较适合于大空间取暖，除了温升速度稍慢些外，没有上述其他电暖器的缺点。

电暖器是季节性产品，每次换季收藏前，应清除加热表面的灰尘，放置在较为干燥的地方储存，以备下次使用。

fangjian kongqi tiaojieqi

房间空气调节器 (room air conditioner)

用于向封闭的空间、房间或区域直接提供经过处理的空气的制冷器具（见家用电器），又称为空调器。用于制冷的空调器，其制冷能力以制冷量（单位时间内从封闭的房间、空间或区域内除去的热量）表示，单位为W。各国空调器制冷量范围规定不一，在中国，空调器的制冷量在14 000W以下。

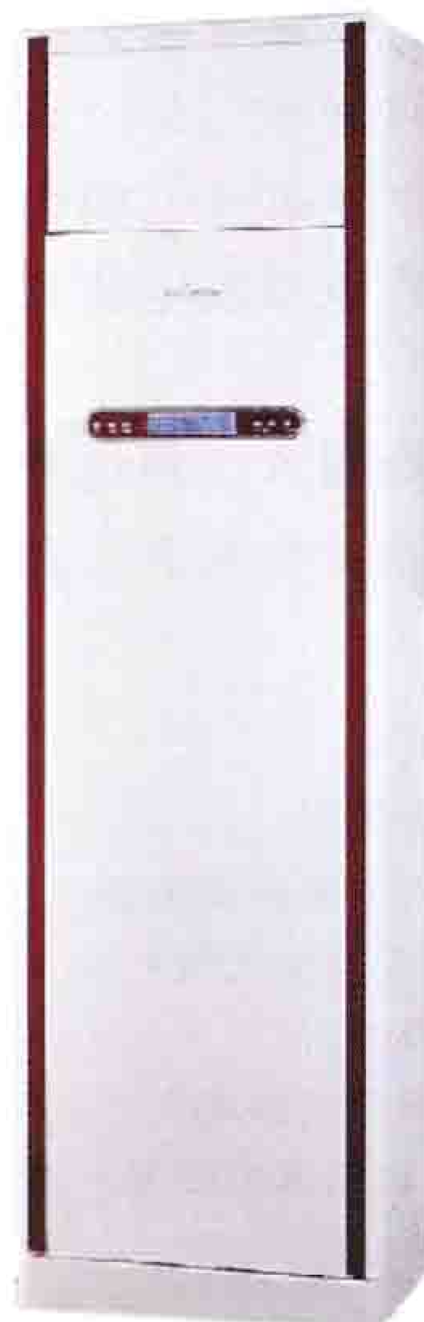


图1 空调器

分类　空调器（见图1）按结构形式分为整体式和分体式。整体式包括窗式、穿墙式、移动式；分体式分为室内机组和室外机组，室内机组又可做成吊顶式、挂壁式、落地式、嵌入式或台式等。按功能分为冷风型、热泵型、电热型、热泵辅助电热型等。按冷凝器的冷却方式分为水冷式和空冷式（空气冷却式），家用空调器一般都采用空冷式。

在中国，整体式空调器已不多见，绝大部分产品都是分体式的。

结构　空调器主要由制冷系统、控制系统及箱体部分组成。

制冷系统主要由压缩机、冷凝器、节流装置和蒸发器组成的封闭系统，其内充满制冷剂。如图2和图3所示，分体挂壁式空调器的压缩机和节流装置（毛细管）置于室外。在制冷模式下，室内机的换热器是蒸发器，室外机的换热器是冷凝器；在制热模式下，室内机的换热器是冷凝器，室外机的换热器是蒸发器。

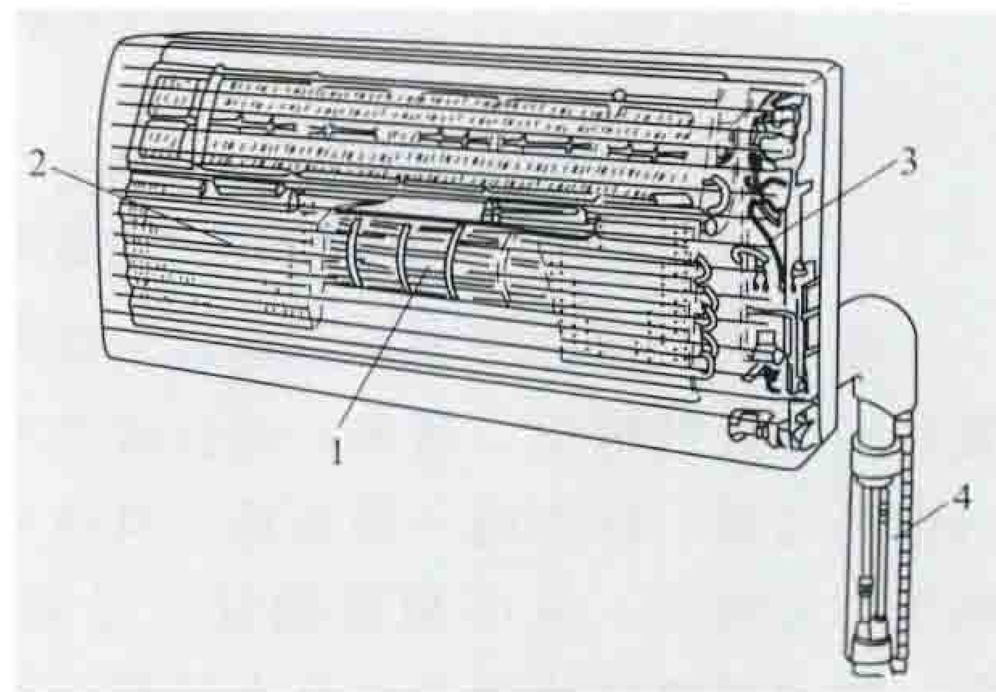


图2 分体挂壁式空调器室内机结构
1—轴流风扇；2—换热器；3—控制盒；4—连接管

空气循环系统主要由风扇电机、离心风扇、轴流风扇、空气过滤器等组成。

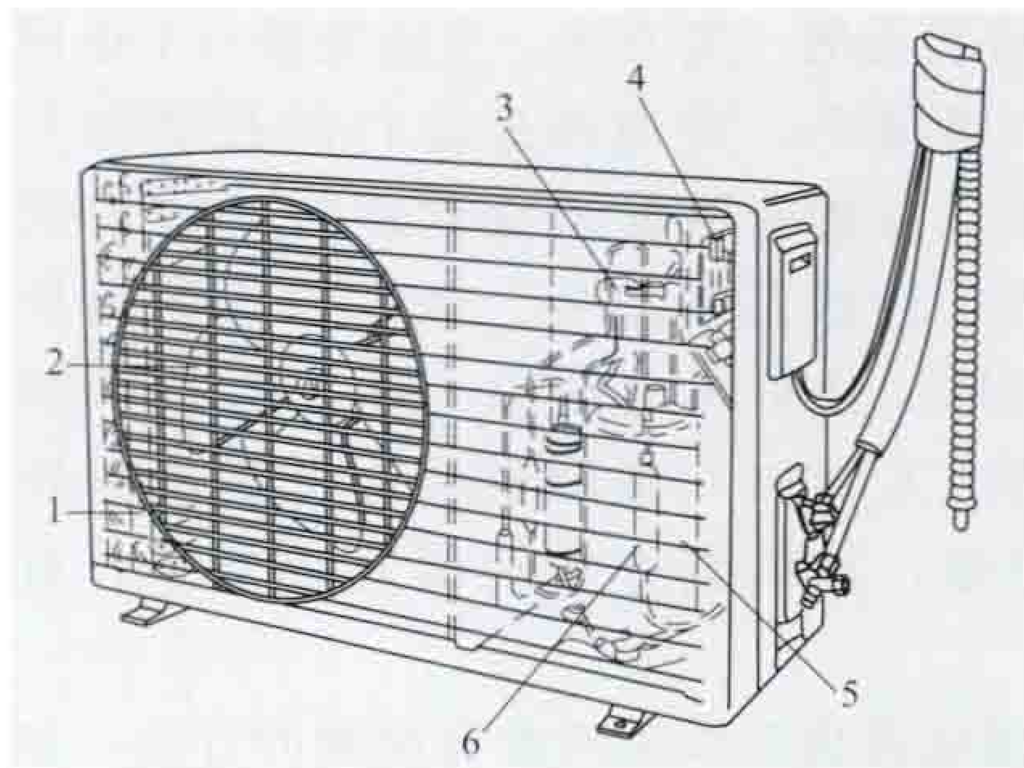


图3 分体挂壁式空调器室外机结构
1—换热器；2—风扇；3—四通换向阀；4—电器盒；5—压缩机；6—毛细管

控制系统主要包括温度控制器、选择开关、过载保护器、电磁换向阀等。

箱体部分主要包括外壳、底盘、面板等。

工作原理　空调器工作原理示意图见图4。制冷运行时，压缩机吸入制冷系统内的低压气体，经压缩形成高压高温气体送入冷凝器，通过室外风机的作用，使室外空气与高压高温制冷剂蒸气在冷凝器内换热，将

高温高压制冷剂蒸气的热量带走排至室外，使制冷剂冷凝成液体，液态制冷剂经毛细管节流后进入室内机的蒸发器内蒸发，在室内风机的作用下，室内空气与液态制冷剂在蒸发器内换热，液态制冷剂吸收热量蒸发，降低房间温度。由于蒸发器的表面温度低于空气的露点温度，故室内空气中的水蒸气在急剧降温时冷凝成水滴排走。如此往复循环，达到改变房间温度和湿度的目的。通过调节电动机的转速，可调节空气的流速。

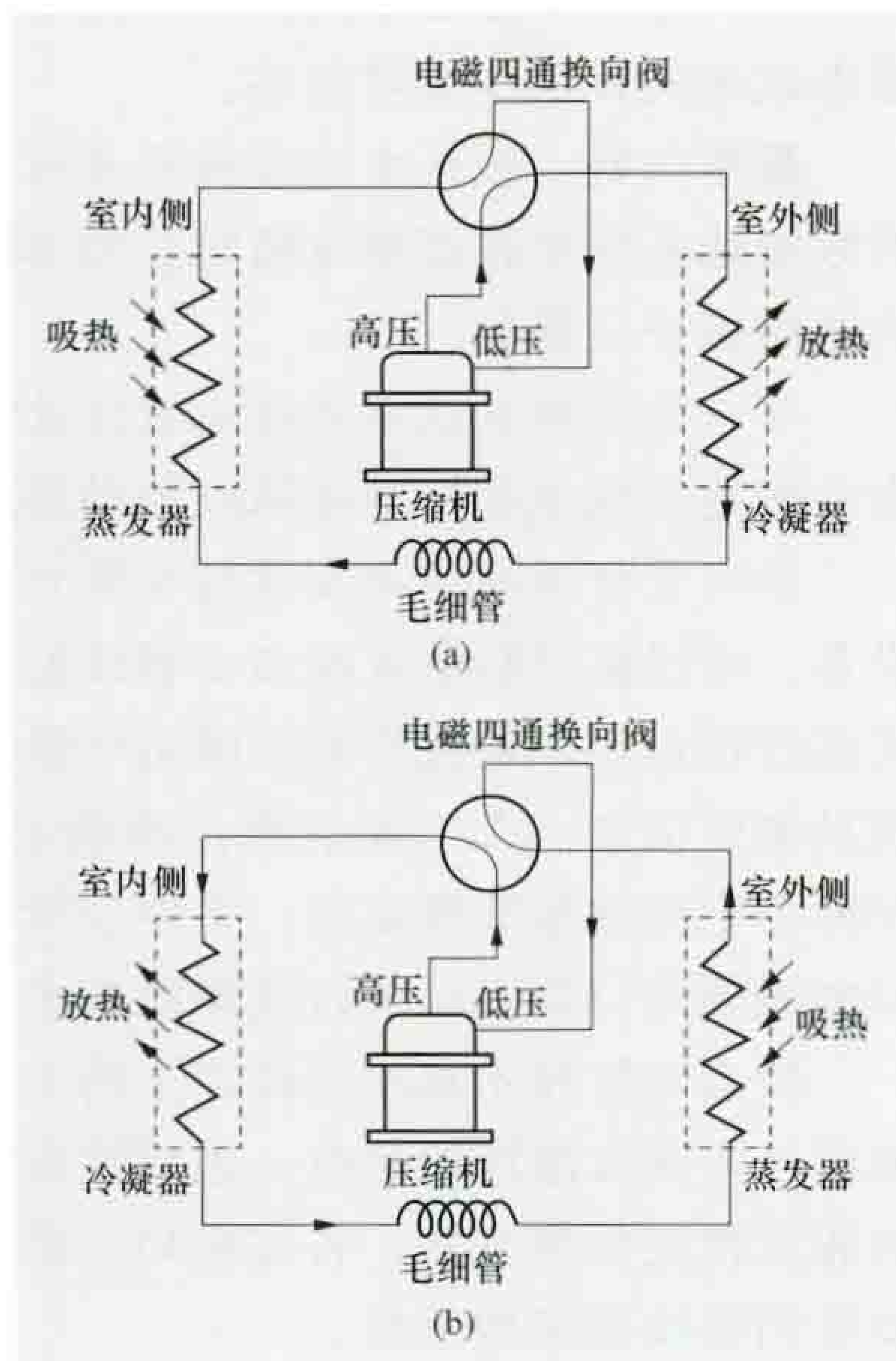


图 4　空调器工作原理示意图
(a) 制冷工况；(b) 制热工况

热泵型空调器具有制冷、制热功能。其制热功能主要靠安装在制冷系统中的电磁换向阀完成。需要制热时，选择“制热”功能，通过电磁换向阀换向，使制冷剂在系统内的流向与图 4 所示的流向相反，蒸发器和冷凝器的作用互换，达到制热的目的。

空调器工作的环境温度通常为 18～43℃。热泵型空调器制热运行时，其工作的环境温度可达－7℃。环境温度越低，热泵制热的效率越低。

安装与使用　空调器应安装牢固并加设遮光防雨罩。窗式空调器安装时应稍向室外侧倾斜，以排除冷凝水。空调器用专用线供电，不能用分支插座。在供电线路上加装熔断器。电源一般为单相 220V 或三相 380V 交流电，其供电电压波动范围应在额定电压的±10%以内。使用时，当压缩机停机后，必须间隔 3min 再起动。电热制热时，注意控制电路不应使风扇停转。遇有停电时，应立即将控制开关拨至“停”位。空调器过滤网应定期清洗，以提高空气清新度。空调器的冷凝器、蒸发器易积灰尘，亦应定期清理。清洗时应使用软毛刷或软质布料，小心轻刷；过滤网清洗完毕应晾干后放回原位。

简史　1844 年，美国人 J. 戈里设计制造的压缩空气制冷机用于商业制冷和空气调节。1902 年，美国人 W. H. 卡里尔创制空气调节装置。1931 年美国提出窗式空调器专利。1936 年，日本创制成落地式空冷房间空气调节器。1953 年日本生产出实用的窗式空调器。1960 年日本开发了热泵型空调器，1961 年分体式空调器进入家庭。80 年代日本实现了空调器的变频控制，减少了空调房间的温度波动，提高了舒适性，节约了能源。中国于 1963 年开始研制空调器，1965 年上海电器冰箱厂生产了第一批窗式空调器。

氟利昂制冷剂具有破坏大气臭氧层的作用。1987 年 9 月 16 日 24 个国家签署了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》，简称《蒙特利尔议定书》，规定了各类含氟物质的禁用时间表。中国于 1991 年 6 月 14 日，正式签署议定书。

feidian baoan cuoshi

非电保安措施　(non-electrical security measures)

为保证用户重要用电设备及人身安全而采取的无任何电联系的应急手段与方法，又称非电性质的保安措施。世界各国都非常重视供用电安全问题，大多采取行政、技术等手段要求重要用户配置非电保安措施。中国对重要用户配置非电保安措施也有明确规定。当所有供电电源、备用电源和应急电源均处于失电的情况下，重要用户需配备非电性质的应急措施以满足自身的安全需要。如：对管道阀门等设备，除配置电气控制装置之外，还必须配备无任何电联系的应急措施，保证能手动开启或关闭相应设备或装置；井工煤矿用户，在配备电气控制的矿井提升系统的同时，还必须设置人工逃生设施及通道等。

feixianxing fuhe

非线性负荷　(non-linear load)　具有非线性阻抗特性的电气设备从电力系统吸取的功率。非线性阻抗特性的电气设备，其阻抗随外施电压或电流的变化而变化，或者说其阻抗是电压或电流的函数。当向这类非线性阻抗特性的电气设备外施正弦波形的电压时，它将从电力系统吸取非正弦波形的电流；当向这类设备通以正弦波形的电流时，其受电端即形成非正弦波形的电压。因此，非线性负荷的最大特点是会引起电力系统电压或电流正弦波形的畸变。

产生非线性负荷的设备有半导体整流器、逆变器、变频器、电力机车、电弧炉、感应电炉或加热器、气体放电灯，各种半导体调压、调相、调频装置以及用半导体元件做成的各种家用电器等。这些设备的容量大到几万千瓦，小到十几瓦。

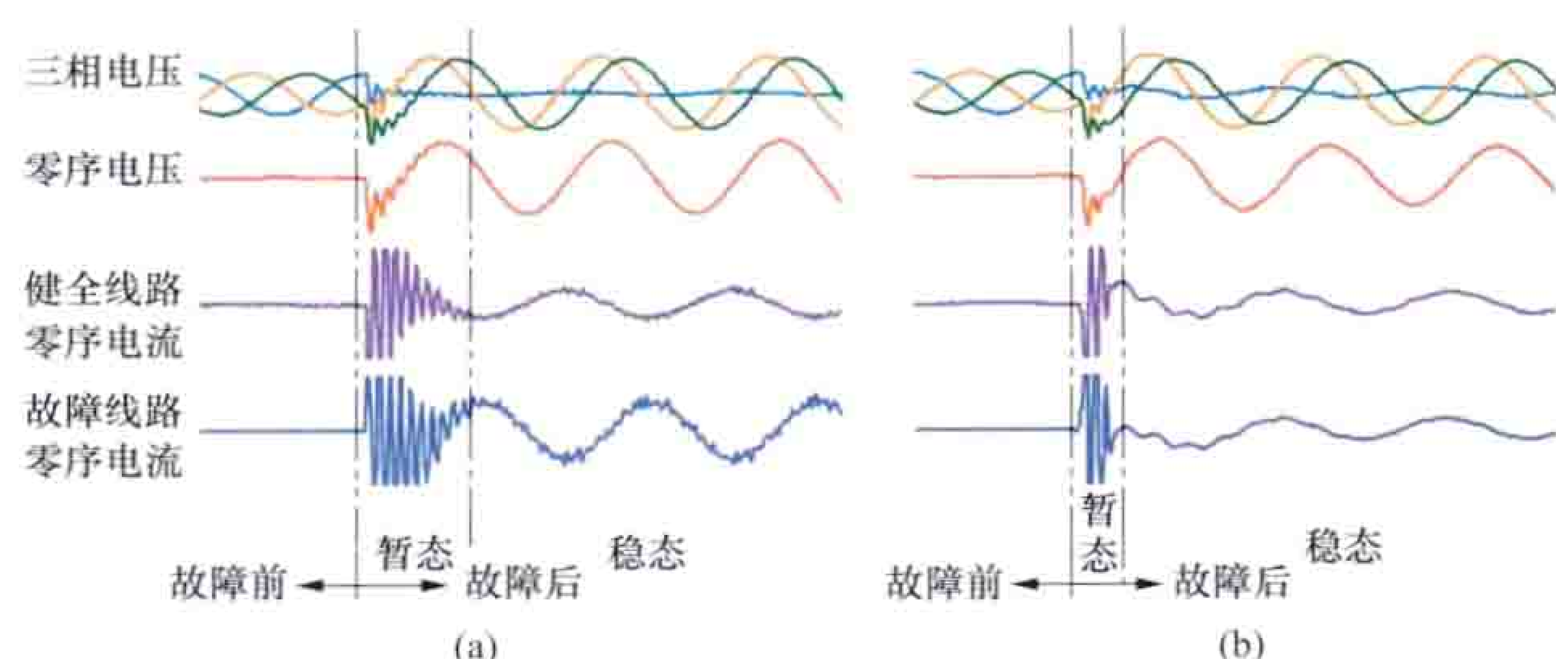
产生非线性负荷的设备称为谐波源。在电力系统中，各种谐波源产生的谐波对电力系统造成了污染，影响到整个电气环境，包括电力系统本身和广大用户。因此，不论从保证电力系统的安全经济运行还是从保证电气设备正常运行来看，对谐波污染造成的危害加以限制都是必要的。必须对非线性负荷采取措施（如装设滤波器等），将谐波限制在规定值以下。

feiyouxiao jiedi xitong danxiang jiedi baohu

非有效接地系统单相接地保护　(single-phase earth protection for non-solidly earthed systems)　实现中性点非有效接地配电网单相接地故障选线、定位和隔离的继电保护措施。由于故障电流小（一般在数十安培以内），通常将中性点非有效接地系统的单相接地故障称为小电流接地故障，其保护措施又称为小电流接地故障保护。保护利用的故障量除了由故障产生的电流/电压的工频分量、谐波分量、暂态分量以及行波信号外，还有由消弧线圈补偿度改变、向系统中性点投入电阻、向系统注入信号源等方式产生的工频或非工频电流信号。非有效接地系统单相接地保护可以提示运行人员故障线路、故障位置，必要时可自动隔离故障线路或故障区段，既可避免或减小人工拉路、人工巡线所需的大

量人力物力，加快故障查找和修复速度，又可避免或减小系统长期带故障运行可能面临的弧光过电压等危害。（见中压配电网中性点接地方式）

故障特征 包括主要反映故障工频电压、电流的稳态特征和主要反映故障主谐振过程的暂态特征。稳态特征在中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统中有明显差异，主要反映在故障线路与健全线路的工频电流幅值和极性关系上。暂态特征主要表示各出线暂态电流的幅值和极性关系，在中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统中无明显差异。中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统中小电流接地故障前后电压、电流变化典型波形如图所示。



小电流接地故障前后电压、电流变化典型波形

（a）中性点不接地系统；（b）中性点经消弧线圈接地系统

不接地系统故障稳态特征 ①电压特征。接地相电压降低，两个健全相电压升高，出现零序电压。故障点过渡电阻越小，上述电压变化越明显。同时，三相间的线电压始终保持正常状态。②故障零序电流的分布规律。对于变电站或配电所各出线口，故障线路零序电流幅值最大，流向（极性）与健全线路相反；在故障线路上，故障点上游零序电流幅值一般远大于下游零序电流，且流向（极性）相反。③故障点电流为同一系统中所有线路对地分布电容电流之和，在金属性接地时最大（一般在数安培到数十安培）。④对于健全线路或故障点下游（负荷侧）线路的检测点，其故障电流为该检测点下游线路对地分布电容电流，从母线流向线路。⑤对于故障点上游（母线侧）线路的检测点，其故障电流为所有健全线路对地分布电容电流与该检测点到母线间线路对地分布电容电流之和，方向从线路流向母线。

经消弧线圈接地系统故障稳态特征 ①电压变化规律与不接地系统中相同。②故障零序电流的分布规律。在消弧线圈过补偿条件下，对于变电站或配电所各出线口，故障线路零序电流幅值不一定最大，流向（极性）与其他健全线路相同；在故障线路上，故障点上游零序电流幅值与下游零序电流幅值接近，二者流向（极性）也相同。③故障点电流，相比于不接地系统，其幅值明显降低，一般在数安培，这是由于消弧线圈电感电流与线路对地电容电流相位相反，大部分电流相互抵消。

非有效接地系统故障暂态特征 故障暂态电流幅值远大于工频电流，可达数百安培，暂态主谐振频率一般在200Hz～2kHz。暂态电流的分布规律与中性点不接地系统中工频零序电流相同：故障线路暂态电流幅值最大，流向（极性）和健全线路相反；故障点上游线路与下游线路的暂态电流流向相反，一般情况下上游线路暂态电流幅值远大于下游线路。此外，由于故障点上游和下游的暂态谐振过程近似独立，故障点两侧暂态电流波形不相似。无论是中性点不接地系统和还是经消弧线圈接地系统，暂态电流的分布规律都相同，这主要是由于消弧线圈的电感特性，其对较高频率暂态电流的补偿作用可忽略。

基本内容 包括非有效接地系统单相接地故障选线、非有效接地系统单相接地故障定位和非有效接地系统单相接地自适应保护三部分。

非有效接地系统单相接地故障选线 用以选择、鉴别非有效接地系统单相接地故障线路的继电保护措施。

非有效接地系统单相接地故障定位 利用线路两端检测设备、沿线路安装的故障指示器或配电网自动化终端、便携式巡线设备等，通过检测故障电气量信息或其他设备产生的扰动电流信息，人工或系统自动确定故障区段或故障位置，又称小电流接地故障定位。主要包括暂态定位技术、利用扰动电流的定位技术以及行波测距技术。

暂态定位技术利用故障产生的主谐振过程暂态电压、电流信号实现故障区段定位。包括暂态功率方向定位和暂态电流相似性定位等方法，各方法均可适用于中性点不接地系统或经消弧线圈接地系统。

暂态功率方向定位是利用故障点两侧暂态无功功率方向相反的特点确定故障区段。故障暂态电压和暂态电流所对应的暂态功率主要是线路对地分布电容吸收的无功功率，其在故障点上游由线路流向母线，而在下游由母线流向线路，即健全区段两侧暂态无功功率流向相同，而故障区段两侧暂态无功功率流向相反，据此可确定故障区段。该方式适用于能够同时获得电压和电流信号的情况。

暂态电流相似性定位是利用故障点两侧暂态电流波形不相似的特点确定故障区段。故障点两侧暂态过程相对独立，两侧的暂态电流相似程度低，而健全区段两侧暂态电流相似程度高，故障点位于两侧暂态电流相似度最低的区段。该方法适用于仅能获得电流信号的情况。

扰动电流定位技术利用其他设备附加到系统中的工频或非工频电流信号实现故障定位。对于沿线路安装有故障检测装置（配电网自动化终端或者故障指示器）的情况，故障区段的判据为：故障位于最末一个检测到扰动电流的检测装置与第一个没有检测到扰动电流的检测装置之间。也可以利用便携式巡线设备接收扰动电流信号，利用信号寻迹原理确定故障位置。

扰动电流的产生方法包括：在系统中性点投入阻抗、改变消弧线圈补偿度；在系统中附加幅值较大或在时序上具有一定变化规律的工频电流；在变电站或线路上，通过电压互感器（TV）、消弧线圈二次侧或串联电容等方式，向系统注入非工频电流信号。

行波测距技术利用故障产生的暂态电压、电流行波信号在线路上的传播时间，测量故障点到测量点的距离。该技术主要适用于线路较长、结构简单、无或少分支的配电线路，对于架空电缆混合线路普遍、分支线众多的配电线路适应性不强。

非有效接地系统单相接地自适应保护 在可靠选线和定位的基础上，综合考虑过电压水平、绝缘状态、负荷性质等因素，确定是否跳闸或隔离故障区段，以及何时跳闸或隔离。在保留系统可带接地故障运行优点的同时，避免过电压

等危害，兼顾供电可靠性和安全性两个因素。

feiyouxiao jiedi xitong danxiang jiedi guzhang xuanxian

非有效接地系统单相接地故障选线 (line identification of single-phase earth protection for non-solidly earthed systems) 用以选择、鉴别非有效接地系统单相接地故障线路的继电保护措施，又称为小电流接地故障选线，简称选线。受故障电流微弱、故障点不稳定、消弧线圈补偿作用等因素影响，长期以来小电流接地故障选线未得到完全解决，过去主要借助人工试拉路方法鉴别故障线路，这样将导致健全线路不必要的短时停电，影响系统的供电可靠性。已有多种选线原理和方法得到实用，可以分为利用故障自身产生信息的被动式选线方法和利用其他设备附加电流的主动式选线方法。

被动式选线方法 利用故障产生的电压和电流信号鉴别故障线路。所利用的故障量主要包括故障产生的零序电压和零序电流的工频分量、谐波分量、暂态分量以及高频行波。被动式选线方法主要包括工频电流选线法、谐波选线法、有功电流选线法、暂态选线法和行波选线法。

工频电流选线法 利用同一母线上各条线路出口故障工频零序电流的幅值、极性关系或功率方向鉴别故障线路。具体判据包括：①幅值越限法，线路出口零序电流幅值大于预设门槛则为故障线路；②幅值比较法，选择各线路出口零序电流幅值最大的线路为故障线路；③极性比较法，选择各线路出口零序电流中与其他线路极性不同的线路为故障线路，如果所有出线零序电流极性相同则为母线故障；④群体比幅比相法，在出口零序电流幅值较大的若干条线路中，再选择与其他线路零序电流极性相反的线路为故障线路；⑤无功功率方向法，选择零序电流相位超前零序电压约90°的出线为故障线路。工频电流选线法受消弧线圈工频补偿影响，不适用于经消弧线圈接地系统。

谐波选线法 利用同一母线上各条线路出口故障零序谐波电流的幅值、极性关系鉴别故障线路。受系统电源、负荷和故障点非线性等因素影响，故障电流中存在一定谐波分量，且消弧线圈对谐波电流的补偿作用可以忽略。即无论对于中性点不接地系统还是经消弧线圈接地系统，故障线路的谐波电流总比非故障线路的幅值大且极性（流向）相反，据此可选择故障线路。该方法受系统谐波源和故障位置等因素影响，故障谐波电流的含量较小且不稳定，效果并不理想。

有功电流选线法 利用同一母线上各条线路出口的故障工频零序电流有功分量鉴别故障线路。接地电流中含有一定有功分量，且不能被消弧线圈补偿。即无论对于中性点不接地系统还是经消弧线圈接地系统，故障线路有功电流比非故障线路的大且极性（流向）相反，据此可选择故障线路。有功电流含量小且受互感器误差影响不易被提取，该方法效果不理想。

暂态选线法 利用同一母线上各条线路出口的故障暂态电流幅值、极性关系或功率方向鉴别故障线路。暂态电流产生于接地瞬间，信号频率高（主谐振分量一般在200Hz～2kHz），不受呈感性的消弧线圈的影响，该方法既适用于不接地系统又适用于经消弧线圈接地系统。包括早期的首半波法和新型暂态法。

（1）首半波法。利用故障线路暂态零序电流与暂态零序电压初始（暂态的第一个半波）极性相反的特点鉴别故障线路，是暂态选线的早期形式，由于暂态首半波的持续时间不确定，检测可靠性较低。

（2）新型暂态法。利用暂态主谐振过程的电压和电流信号鉴别故障线路。由于暂态电流幅值大且在间歇性接地、弧光接地时暂态信号更丰富，检测可靠性高。具体判据包括：①暂态电流幅值比较法，选择各线路出口暂态零序电流幅值最大的线路为故障线路；②暂态电流极性比较法，选择各线路出口暂态零序电流中与其他线路极性不同的线路为故障线路，如果所有出线暂态零序电流极性相同则为母线故障；③暂态群体比幅比相法，在出口处暂态零序电流幅值较大的若干条线路中，再选择与其他线路暂态零序电流极性相反的线路为故障线路；④暂态功率方向法，定义暂态无功功率为暂态零序电压的导数或Hilbert变换与暂态零序电流的乘积，选择暂态无功功率流向母线的线路为故障线路。

行波选线法 利用同一母线上各条线路出口的故障电流行波的幅值、极性关系鉴别故障线路。除了工频电流、谐波电流和暂态电流外，小电流接地故障也会产生频率更高的电流行波信号。在一个较短的时间内（一般为微秒级），与其他健全线路相比，故障线路电流行波也具有幅值最大且极性相反的特点，据此可鉴别故障线路。但受配电线路长度短、架空电缆混合普遍、分支线众多、负荷分布广泛等影响，行波折反射过程非常复杂，其幅值和极性关系成立时间极短，选线可靠性不高。

主动式选线方法 利用专用一次设备或其他一次设备动作配合，改变一次系统运行状态产生较大的工频扰动电流，或利用信号注入设备向系统中注入特定扰动电流信号，通过检测这些扰动电流信号鉴别故障线路。具体可分为注入信号选线法、残流增量选线法、小扰动选线法、中电阻选线法等。各主动式选线方法的工作机理基本相同，效果主要取决于各方法产生扰动电流的幅值以及频率、可重复性等因素，且由于需要一次设备动作，易给系统带来安全隐患。

注入信号选线法 通过检测外加信号源向系统注入的非工频扰动电流信号鉴别故障线路。在金属性接地或接地电阻较小时，接地相电压互感器二次输出接近为零，通过该电压互感器向一次系统反向注入一非工频电流信号，该信号仅流入故障线路，即检测到注入电流的线路为故障线路。注入电流的幅值为数百毫安到数安不等，频率取在各次谐波之间，防止被工频及谐波分量干扰。高阻接地故障时，故障相电压互感器输出值较大，可通过消弧线圈二次绕组向一次系统注入电流。

残流增量选线法 通过检测系统在消弧线圈补偿度发生改变时故障电流的变化量鉴别故障线路。预调谐方式消弧线圈须在接地故障后数秒内切除其阻尼电阻，随调谐方式消弧线圈正常运行时偏离应有补偿状态，接地后才迅速调整到合理补偿度，上述消弧线圈的调整均将使故障电流发生变化。对金属性接地，仅故障线路存在电流变化；而对有过渡电阻的接地故障，各出线故障电流均有变化，但故障线路变化量最大，据此可鉴别故障线路。

小扰动选线法　对非机械调谐的消弧线圈，利用电力电子器件动作速度快的特点实现持续时间短暂的故障电流变化（一般为数个工频周期），并利用残流增量选线原理鉴别故障线路，是残流增量选线法的一种特殊形式，可利用特殊的动态配合和多次校核（重复选线）等措施提高选线的可靠性。

中电阻选线法　故障后在系统中性点投入中电阻，通过检测其所产生的电流信号鉴别故障线路。在接地故障发生并持续一定时限后，在系统中性点投入一个阻值适中的电阻，在系统零序电压作用下将产生数十安培的有功电流，选择电流变化最大的线路为故障线路。选线结束后要立即切除并联电阻，电阻投入的时间一般从数百毫秒到数秒。中电阻选线与残流增量选线方法在原理上是相同的，区别主要在于中电阻产生的扰动电流更大。

fenbushi dianyuan bingwang baohu

分布式电源并网保护　(intertie protection of distributed electric resources)　分布式电源并网点处的继电保护措施。保护应能检测到主电网侧（系统侧）和分布式电源侧发生的故障和其他各种异常情况，并及时将分布式电源与主电网隔离，避免损坏分布式电源发电装置或者危及主电网的正常运行。分布式电源一般以同步电机、感应电机、变流器等形式接入35kV及以下电压等级电网，其故障情况下的特性与常规电源不同。以变流器形式并网的分布式电源，受控制系统的作用，在外部故障时，对故障点提供的故障电流远低于常规电源，最大短路电流一般限制在其额定电流的1.5倍以下。为解决分布式电源与电网保护和重合闸之间的协调性问题，应限制分布式电源的接入容量、短路容量，或者在并网接入点加装串联电抗器或短路电流限制器来限制短路电流。分布式电源并网保护的配置取决于分布式电源的类型、容量、并网点和并网形式。分布式电源并网保护应与主电网侧保护设置相配合，满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性的要求，且与分布式电源电压电流与频率响应特性要求协调，包括反孤岛保护、系统故障保护、分布式电源故障保护、其他异常保护。

反孤岛保护　防止分布式电源并网发电系统非计划持续孤岛运行的继电保护措施。

系统故障保护　应能够检测到并网点主电网侧的短路故障（包括单相接地故障）和缺相故障，当发生短路故障和缺相故障时应能迅速将分布式电源从主电网断开。该类保护可由电流差动、过电流、距离、欠电压、过电压、负序电流、负序电压等元件构成。过电流保护可带电压闭锁或者方向闭锁功能，以提高灵敏性，确保选择性。通过10（6）～35kV电压等级并网的分布式电源，宜采用专线方式接入电网并配置光纤电流差动保护。在满足可靠性、选择性、灵敏性和速动性要求时，线路也可采用“T”接方式，保护由电流、电压元件构成。

分布式电源故障保护　分布式电源中的发电机、变压器、变流器应配置可靠的保护装置，以检测自身的故障和其他各种异常状态。

当分布式电源设计为不可逆并网方式时，应配置逆向功率保护。

发电机保护　应根据发电机的电压等级和容量，针对定子绕组和励磁回路各种故障，配置欠电压、过电压、欠频率、过频率、过电流、短路、缺相、失步等保护。

变压器保护　应根据变压器（见图）的电压等级和容量，针对绕组及其引出线的相间短路、绕组的匝间短路、外部相间短路引起的过电流等，配置电流速断保护、定时限过电流保护，对油浸式变压器还应配置瓦斯保护。



三相干式变压器

变流器保护　根据变流器的不同类型，宜配置过电流保护、缺相保护、相序错误保护、接地故障保护、过热保护、交直流过/欠电压保护、与主控系统的通信故障保护。采用冷却系统的变流器应设置冷却系统故障保护。变流器应设置电网断电保护，当电网断电时，变流器应停机。变流器应设置恢复并网保护，当由于超限状态导致变流器停止向电网供电后，在电网的电压和频率恢复到正常范围后的一段时间内，变流器不应向电网供电。变流器应设置功率器件故障硬件保护功能，以应对功率电子器件（模块）的断路或者失效。

其他异常保护　当分布式电源并网点处发生除故障之外的其他各种异常情况，如电压越限、过负荷、非同期合闸等，应有相应的保护措施。

防止电压越限　大容量分布式电源的接入，特别是当其接在接近主电网末端时，随着其出力的变化，可能会使得主电网末端的电压超出允许范围。这一方面需要靠控制手段来解决，另一方面也可安装必要的过电压和欠电压保护来提供告警信号，甚至直接跳开分布式电源。

防止过负荷　当分布式电源的出力过大，可能会超出与其相连的线路或变压器的热容量时，宜装设过负荷保护。

防止非同期合闸　为防止分布式电源的非同期并网给主电网和分布式电源本身带来冲击甚至损害，宜在并网点处安装同期检测继电器，但该继电器并不能代替同期合闸控制装置。主电网侧线路重合闸投入时，必须投入检无压元件，以确保分布式电源已经跳开，线路不带电。

与分布式电源响应特性的协调　在并网技术规范对分布式电源的电压、频率和过电流响应特性提出要求时，电压保护、频率保护和过电流保护的定值应与之协调。

电压保护　当电网电压过高或者过低时，要求与之相连的分布式电源做出响应。该响应必须确保供电机构维修人员和一般公众的人身安全，同时避免损坏连接设备。当并网点处的电压超出规范规定的范围时，应在相应的时间内停止向电网线路送电。

频率保护　对于通过380V电压等级并网的分布式电源，当并网点频率超过49.5～50.2Hz运行范围时，应在0.2s内停止向电网送电。通过10（6）～35kV电压等级并网的分布式电源应具备一定的耐受系统频率异常的能力，能

够在允许的电网频率偏离下运行。

过电流保护　变流器类型分布式电源应具备一定的过电流能力，在120%额定电流以下，变流器类型分布式电源可靠工作时间不小于1min；在120%～150%额定电流内，变流器类型分布式电源连续可靠工作时间应不小于10s。

参考书目

努尔丁．有源智能配电网．陶顺，肖湘宁，彭骋，编译．北京：中国电力出版社，2012.

fenbushi dianyuan bingwang jishu

分布式电源并网技术　（integration of distributed electric resources）　分布式电源接入配电网以及保证含分布式电源的配电网安全可靠运行、电能质量合格的技术措施。传统的配电网是一个向用户分配电力、功率单向流动的无源网络，而分布式电源的接入，使配电网成为一个功率双向流动的有源网络，同时也带来了电压波动、继电保护误动或拒动等技术问题。分布式电源接入对配电网的影响、有源配电网规划、分布式电源并网保护与控制、有源配电网保护、有源配电网电压控制、有源配电网电能质量控制、分布式电源调度与管理等，是电力技术研究的热点。

技术分类　根据分布式电源在配电网中的渗透率（分布式电源容量与配电网额定容量的比例）以及所采取的技术措施，可将分布式电源并网技术分为即接即忘、宽限接入与主动网络管理三种类型。

即接即忘技术　将分布式电源看作“负功率”负荷而忽略其影响，或者说不用对现有配电网网架、保护控制手段以及运行管理方式进行相应的改造与调整。即接即忘（fix and forget）的前提是严格控制分布式电源的接入容量，使其不对现有配电网产生实质性的影响，例如，美国供电企业曾要求一条馈线上接入的分布式电源的容量不大于其最小负荷功率的10%。20世纪90年代初，由于当时分布式电源应用较少，为减少投资、简化工作程序与运行管理，分布式电源并网一般采取即接即忘技术。

宽限接入技术　不再对接入容量进行硬性限制，在保证配电网安全（配电设备不超载、短路容量不超标、保护不失效）与电能质量合格的前提下，允许最大程度地接入分布式电源。进入21世纪，大量的分布式电源需要并网，即接即忘的原则已不能适应这种情况，一些国家转而对分布式电源并网采用更为积极的宽限接入原则，通过对现有配电网进行适当的技术改造（如加装故障限流器）以及调整运行管理方式，进一步提高配电网对分布式电源的接纳能力。美国以及欧洲大部分国家对分布式电源并网都采用这种宽限接入的技术。有的国家仍然规定分布式电源接入的容量上限，但由于给出的容量上限比较高，如意大利规定接入的分布式电源累计容量不超过上级主变压器容量的60%，西班牙要求不超过50%，仍属于宽限接入。中国国家电网公司规定的容量上限是25%。

主动网络管理技术　允许分布式电源主动参与有功功率和无功功率的调整并具备低电压穿越能力，应用现代网络通信与计算机技术，对配电网、分布式电源以及负荷进行更为积极、主动的协调控制与调度管理。随着分布式电源渗透率的提高，在分布式电源出力高峰阶段配电网会出现功率阻塞现象；当电网频率与电压发生变化时，反孤岛保护动作，大量的分布式电源脱网，也给电力系统的稳定运行带来严重影响。为此，欧盟及欧洲一些国家提出采用主动网络管理（active network management，ANM）措施，以充分发挥分布式电源的作用，优化配电网运行。主动网络管理是国际上分布式电源并网技术研究的热点与发展方向。

关键技术　包括有源配电网规划、分布式电源并网保护与控制、有源配电网继电保护、有源配电网电压控制、分布式电源调度与管理等。

有源配电网规划　包括分布式电源并网点的选择以及网络规划设计两方面。

（1）分布式电源并网点选择。为减少投资，分布式电源一般就近并入当地的配电网。本着保证配电网安全运行以及电能质量合格的原则，分布式电源的容量不同，接入的配电网的电压等级也不同。根据研究结果与运行经验，大型（容量大于8MV·A）分布式电源一般接入变电站中压母线或者上一级高压配电网中；中等容量（250kV·A～8MV·A）的分布式电源一般接入中压配电线路；小型（容量小于250kV·A）分布式电源一般接入低压配电网。

（2）有源配电网络规划设计。有源配电网的规划要全面考虑分布式电源与负荷的时变特征，采用随机分析方法，解决配电网规划中的不确定问题；充分发挥主动控制管理措施的作用，优化配电网运行，提高分布式电源与配电网设备的利用效率。

分布式电源并网保护与控制　分布式电源并网点处的继电保护与控制装置应能检测到主电网一侧和分布式电源一侧发生的故障和其他各种异常情况，并及时将分布式电源与主电网隔离，避免损坏分布式电源发电装置或者危及主电网的正常运行，影响对用户的正常供电。容量较大（250kV·A及以上）的分布式电源应纳入配电网自动化系统监控范围，上报实时运行状态。

有源配电网继电保护　适应分布式电源接入的配电网继电保护措施。根据分布式电源提供的短路电流的大小，其对配电网保护的影响及应对措施可分为3种情况。①分布式电源提供的短路电流有限，对配电网保护的动作没有实质性的影响，无需采取特别的措施。②分布式电源提供的短路电流较大，对配电网保护的动作有一定影响，可通过调整保护定值克服其影响。③分布式电源提供的短路电流很大，对配电网保护的动作产生了很大的影响，需要安装新的保护装置（如纵联保护、方向保护等）保证保护动作的选择性与动作速度。

有源配电网电压控制　保证有源配电网电压合格的控制措施。常规的做法是分布式电源运行在恒功率因数（接近1）的状态下，通过调整变电站调压方法、安装新的电压与无功补偿装置，进而调节配电线路的电压分布，防止分布式电源接入后造成供电电压超过标准规定的限值。随着智能配电网技术的发展，将越来越多地采用集中的或分布式的控制方法，并且分布式电源主动地参与电压无功的控制，实现配电线路的电压与无功的优化控制。

分布式电源调度与管理　对分布式电源的有功与无功出力进行调度与管理的技术措施。常规的配电网运行管理方法，将分布式电源作为一个被动的电能输出装置对待，不对

其有功与无功输出进行控制，因而无法发挥分布式电源的作用，并给电网运行控制带来了困难。在智能配电网中，要对分布式电源的有功与无功输出进行有效的控制、调度与管理，充分发挥分布式电源的作用，实现配电网乃至电力系统整体的优化运行。

分布式电源并网对配电网的影响 ①孤岛运行。在配电线路与主网脱离后，如果分布式电源继续供电，将严重威胁事故处理与检修维护与人员的人身安全。此外，在孤岛运行状态下，供电电压与频率的质量没有保障；分布式电源提供的短路电流，会影响故障电弧的熄灭，影响重合闸的成功率；非同期重合闸引起的冲击电流可能造成重合闸失败，并给分布式电源设备带来危害；对于中性点有效接地的配电系统，配电网与主网脱离后，可能会失去接地的中性点，成为非有效接地系统，如果同时存在单相接地，将引起过电压。因此，分布式电源并网时，必须配置反孤岛保护，在配电网与主网的连接断开时，立即将分布式电源解列，防止出现孤岛运行状态。②电压超标。传统的配电网调压原则是将母线电压维持在一个较高范围内（如 103%～106% 的额定电压），从而保证线路上电压不低于规定的下限值。而分布式电源的接入将改变线路上电压的变化规律，按照传统的调压做法，在分布式电源渗透率较高，特别是因配电线路上负荷水平较低而向系统倒送功率时，会出现线路上电压大于母线电压的情况，从而导致线路上电压超标。由于电网调度人员难以掌握分布式电源的投入、退出时间以及发出的有功功率与无功功率的变化，使配电线路的电压调整控制变得困难。③短路电流水平提高。在配电网故障时，分布式电源提供的短路电流，会提高配电网的短路电流水平，对断路器的遮断容量提出了更高的要求。此外，也可能造成短路电流超出配电设备的热稳定与动稳定电流，影响配电网的安全。④影响继电保护正确动作。分布式电源的接入会改变配电网故障时短路电流幅值与分布特征。故障线路上故障点上游分布式电源提供的短路电流会抬高并网点电压，造成系统流入故障线路的电流减小，降低了变电站出线保护灵敏度，甚至造成拒动。在其他线路上故障时，本线路上分布式电源向故障点提供反向短路电流，可能造成出线保护误动。⑤影响供电质量。风力发电、太阳能发电功率输出具有间歇性特点，会引起电压波动。通过逆变器并网的分布式电源，会向电网注入谐波电流，导致电压波形出现畸变。⑥影响电力系统运行稳定。在分布式电源渗透率比较高时，分布式电源总的输出功率的变化（如在电力系统的电压与频率出现扰动时，分布式电源因反孤岛保护动作与系统解列）将导致电力系统中发电功率与负荷功率出现不平衡或不平衡的情况加剧，影响电力系统的安全稳定运行。

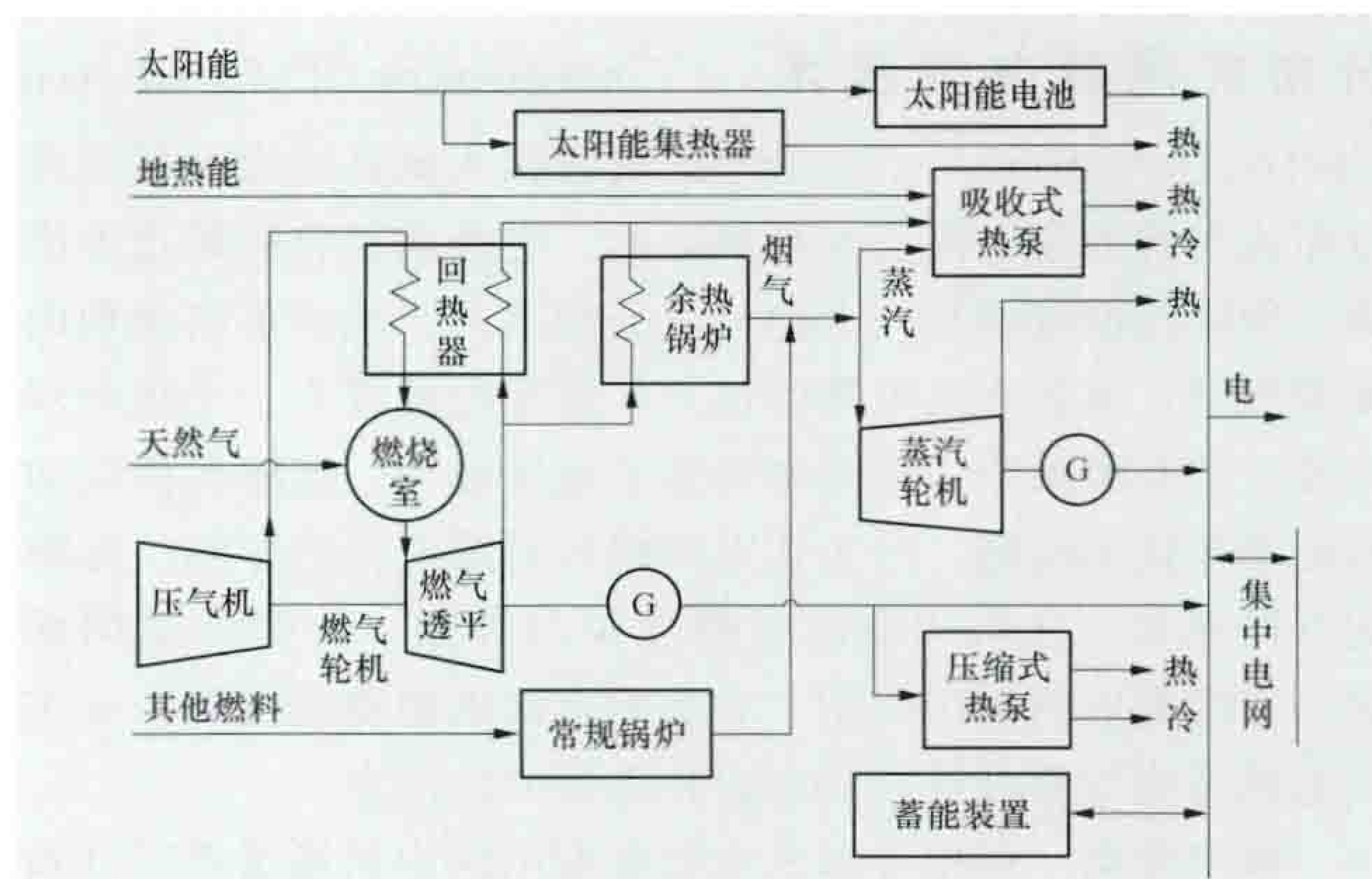
展望 满足可再生能源发电与分布式电源并网的需要，是智能电网提出并获得迅速发展的重要原因。在智能配电网中，不再被动地限制分布式电源接入的容量，而是从有利于发挥分布式电源的作用、节省整体投资出发，广泛应用主动网络管理技术，最大限度地接纳分布式电源，实现配电网的优化运行。

fenbushi re-dian-leng sanliangong nengyuan xitong

分布式热电冷三联供能源系统 (distributed heating-cooling-power cogeneration energy system) 独立建

于社区和企业等集体用户附近，能同时满足其电力、供热、制冷等各种用能需求的能源综合利用系统。该系统在构成上考虑了能量梯级利用，可提高一次能源的利用效率；系统的建设和运行却是独立分散的，可减少输配管网的投资；通过分散生产、大电网统筹，可实现能源的多渠道供应，多层次提高能源利用效率。

系统构成 系统由一次能源、动力机械和联产系统等构成，它既能独立运行，又可使该系统的电网并入集中电网中运行（见图）。



分布式热电冷三联供能源系统示意图

一次能源 一般以天然气为基本能源，但可以将当地可用的其他能源（如太阳能、地热能等）整合起来统一应用。

动力机械 以中、小功率燃气轮机最为理想，烧天然气的往复式内燃机也有应用。用燃气轮机时可通过燃气-蒸汽联合循环获得更高的能量转化效率。

联产系统 电能由动力机械驱动发电机产生，也可由光伏电池等直接从一次能源获得。可利用发电的余能驱动吸收式热泵（如溴化锂吸收式制冷机）获得热能和冷能，也可辅助应用其他形式的能源，如太阳能、地热能、工业余能，以及用其他燃料驱动的常规锅炉和电驱动的压缩式热泵等。

并网 分布式能源系统独立工作时，应按“以热/冷定电”的联产原则运行，多余或不足的电量可用蓄能装置加以适当调节。如能与电网联合运行，则可按最高能量转化效率的原则来配置电、热、冷的比例，将多余的电量供入集中电网；在系统故障、检修时，可从集中电网获得保障。

分布式能源系统的特性 ①新建系统以液体或气体燃料输送取代电力或热力输送。②用户规模、种类多样，可以是居民区、工业企业、大型机关、医院、学校等。③一次能源以气体或液体燃料为主，可再生能源和废弃资源为辅。④二次能源按用户不同需求进行热电冷联产，实现能量梯级利用。⑤可应用各种独立电源技术。⑥可采用各种先进的能源转换技术，包括高效热电联产、就地式可再生能源系统以及能量循环系统。⑦无论联网与否，均可与已有集中供能系统互补，实现最优调度与供电安全。⑧在环境保护方面，可将部分污染分散化、资源化，实现适度排放。

历史与发展 20 世纪 50 年代提出全能量系统的概念，70 年代国际能源危机之后，欧美国家开始重视和开发能量梯级利用和全能量系统，具体实现方案就是针对用户综合需

求的分布式能源系统。随着天然气在燃料结构中占据更大比重以及燃气轮机大量用于发电，建设容易、运行方便的分布式能源系统得到了迅速推广，在发达国家已占据能源系统很大的比重。为致力于分布式能源系统在全球推广和应用，2002年成立了非营利研究机构——国际分布式能源联盟。

随着能源结构的调整，中国天然气在能源利用中的比重增加，风能、太阳能、生物能源发电兴起，2010年以来，以天然气为燃料的分布式能源系统的建设已进入实质性开发与实施阶段。在北京、上海、广州等城市的居民小区、商城楼宇、大学城都有热电冷联产示范工程投运。以燃气轮机为动力机械的项目已有上海浦东国际机场能源中心4000kW燃气轮机热电冷联供系统、北京南站能源中心1570kW燃气轮机热电冷联供项目、广州大学城78MW分布式能源站等。以燃气内燃机为动力的分布式能源系统有更多的应用，至2010年投产的总功率数已超过1500MW。

参考书目

金红光，郑丹星，徐建中．分布式冷热电联产系统装置及应用．北京：中国电力出版社，2010.

fenjie kaiguan baohu

分界开关保护 (boundary load switch protection)

对中压配电网中分界开关下游用户侧故障进行隔离和（或）指示的配电网继电保护措施。对于短路故障，利用分界开关与上游保护配合快速隔离故障，可以将故障影响限制在用户界内，避免扩大停电范围，影响非故障用户的正常供电；对于非有效接地系统单相接地（小电流接地）故障，给出就地指示或上报指示信息，可以进一步缩小故障区段。分界开关保护可以提高故障查找和修复速度，明确事故修复责任，俗称“看门狗”技术。

短路故障隔离技术 用户侧发生短路故障时，由分界开关上游断路器先切除故障，在断路器最后一次重合前，分界开关跳闸隔离故障。分界开关的动作判据为：1次（适用于电缆线路）或连续2次（适用于架空线路）检测到过电流并伴随电流消失现象则跳闸，有些分界开关还需要同时检测到电压消失作为跳闸条件。分界开关的跳闸时间应与断路器重合时间相配合。如图1所示，分界开关Q下游的用户界内发生短路故障时，分界开关Q和上游断路器QF均可检测到过电流信息$\underline{I}_k$。对于电缆线路，断路器QF先跳闸切除故障；分界开关Q检测到过电流并消失（或者过电流和电压同时消失）后，在时间t内跳闸；断路器QF经历时间t后重合，故障点已被分界开关Q隔离，相邻用户恢复供电。对于架空线路，断路器QF先跳闸切除故障；分界开关Q检测到1次过电流并消失（或者过电流和电压同时消失）；经历时间t后，断路器QF重合；对于瞬时性故障，系统恢复正常运行；对于永久故障，断路器QF和分界开关Q再次检测到过电流，断路器QF随后再次跳闸，分界开关Q连续检测到2次过电流并消失（或者过电流和电压同时消失），在第二次过电流消失后时间t内跳闸，断路器QF经历时间t后再次重合，故障点已被分界开关Q隔离，相邻用户恢复供电。

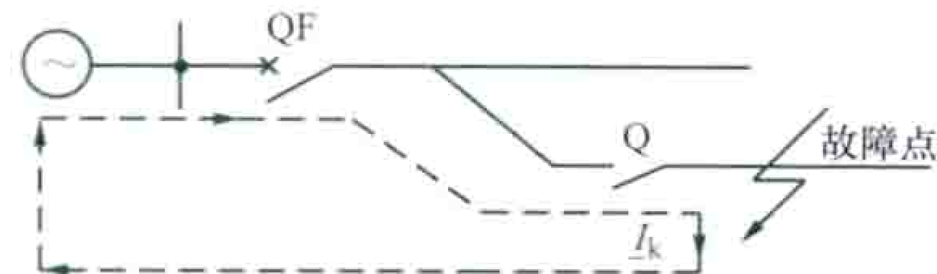


图1　用户界内短路故障示意图

单相接地故障检测技术 对于中性点为非有效接地方式的配电网，用户侧发生单相接地（小电流接地）故障时，由分界开关给出故障指示或上报故障信息。由于分界开关安装位置靠近线路末端，接地故障时检测到的工频和暂态电流特征与线路出口、开关上游线路上检测点不同。分界开关下游接地故障的检测方法主要有工频零序电流幅值检测法、工频零序电流相位检测法、暂态功率方向检测法。

工频零序电流幅值检测法　当分界开关检测到的工频零序电流幅值超越预设的门槛时，则判断为用户侧发生接地故障。其预设门槛设为用户侧线路对地分布电容电流（$3I_0$）乘以可靠系数（一般取1.3左右）。该方法主要适用于分界开关不能获得三相电压或零序电压的情况。

接地点位于用户侧时，分界开关处的故障工频零序电流较接地点位于系统侧时大。无论系统为不接地方式还是经消弧线圈接地方式，在系统侧发生接地故障时，分界开关处故障工频零序电流均为用户侧线路对地分布电容电流；在用户侧发生接地故障时，分界开关处故障工频零序电流均近似为故障点电流。如图2所示，由于分界开关一般安装在线路末端，用户界内线路较短，其对地分布电容电流$\underline{I}_{CC}$不仅远小于系统整体对地分布电容电流（即不接地系统中金属性接地的故障点电流）$\underline{I}_{CU}$，在经消弧线圈接地系统中也一般小于经消弧线圈补偿后的故障点电流$\underline{I}_{CU}+\underline{I}_L$。

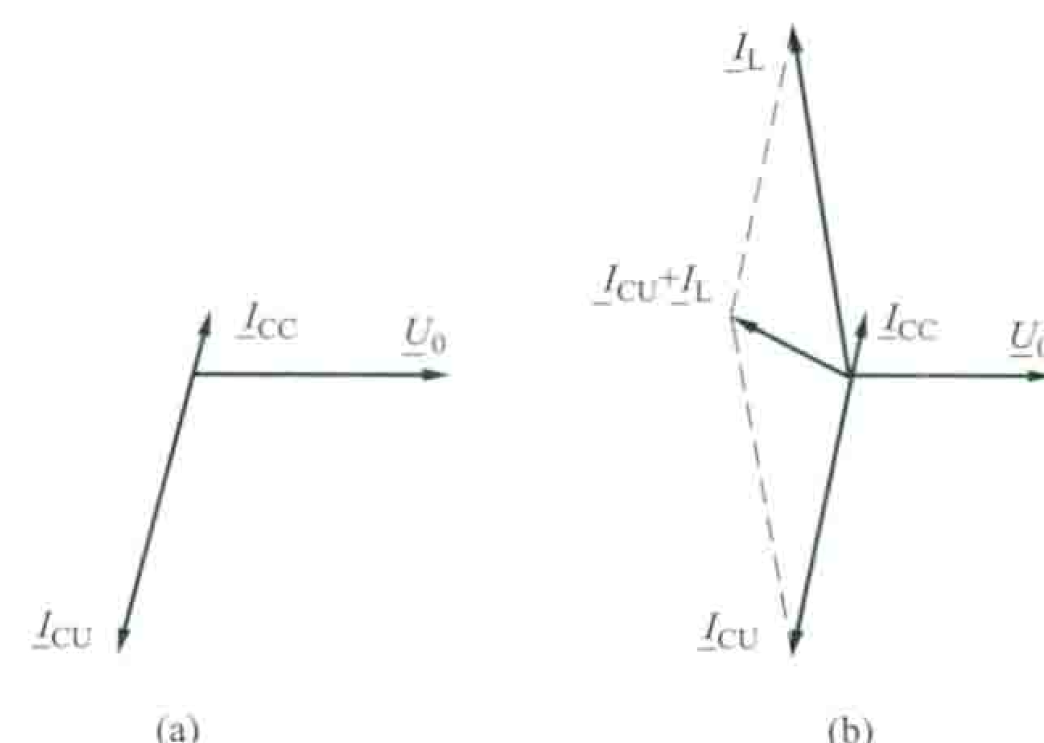


图2　分界开关处工频零序电压和零序电流相位关系

(a) 不接地系统；(b) 经消弧线圈接地系统

工频零序电流相位检测法　当分界开关检测到的工频零序电流相位超前工频零序电压在90°～270°之间时，判断为用户侧发生接地故障。实际应用时可根据TV/TA的测量误差将相位超前的判据范围适当调整，如平移为100°～280°。该方法适用于能同时获得零序电压和零序电流信号的分界开关。

接地点位于用户侧时，分界开关处故障工频零序电流超前零序电压的相位明显大于90°，而系统侧故障时二者的相位差略小于90°。如图2所示，系统侧发生接地故障时，无论系统是不接地或经消弧线圈接地方式，分界开关处故障工频零序电流均为用户侧线路对地分布电容电流$\underline{I}_{CC}$，由母线流向线路，考虑线路有功损耗，$\underline{I}_{CC}$超前零序电压$\underline{U}_0$的相位均略小于90°；如果接地故障发生在用户侧，当系统为不接地方式时，分界开关处故障工频零序电流近似为整个系统对地分布电容电流$\underline{I}_{CU}$，由线路流向母线，考虑线路有功损耗，$\underline{I}_{CU}$超前$\underline{U}_0$的相位略小于270°，而当系统为经消弧线圈接地方式时，分界开关处故障工频零序电流近似为$\underline{I}_{CU}$与消弧线圈电感电流$\underline{I}_L$之和，考虑线路和消弧线圈的有功损耗，$\underline{I}_{CU}+\underline{I}_L$超前$\underline{U}_0$的相位将明显大于90°。

暂态功率方向检测法　利用分界开关处故障暂态零模（与零序概念相同）电压/线电压与暂态零模电流计算其对应的暂态无功功率，当暂态无功功率由线路流向母线时判断为用户侧故障。该方法适用于可以同时获得零序电流、零序电压或线电压的分界开关。

系统在接地故障瞬间会产生明显的暂态过程，暂态零模电流幅值远大于工频零序电流幅值。由于暂态信号频率较高，一般在数百到数千赫，可忽略消弧线圈对暂态电流在系统内分布规律的影响，也可忽略暂态零模电流和暂态零模电压/暂态线电压对应的暂态功率的影响，即无论是不接地系统还是经消弧线圈接地系统，暂态无功功率的流向均不改变。因此，系统侧接地时分界开关处暂态功率由母线流向线路，而用户侧接地时分界开关处暂态无功功率由线路流向母线，二者流向相反，据此可实现故障位置判断。

fengji benglei diankong xitong

风机泵类电控系统　（electric drive control system for fan and pump）　用以实现风机泵类机械正常运转的电力拖动和控制等电路组合的总体。风机泵类机械是应用量大、面广的通用机械。无论是冶金、石油、化工、纺织、煤炭、电力、轻工等，还是农业，都装有大量的风机和水泵。风机和泵类负载的特点是长期工作、平稳负载、起动不困难、运行稳定。通常工厂设计时，按生产中可能需要的最大风量或流量并留有较大的裕量选择风机或泵拖动用的电动机，以前一般采用不调速的运行方式，当实际运行所需风量或流量减小时，只好用挡板调节风量或流量，能量利用率低。20世纪90年代以来，为取得最佳运行效果，这类机械开始要求调速，以达到节能的目的（见风机节电技术、泵类节电技术），因而电控系统也就比不要求调速时的要复杂些，不仅有一般的保护和操作电气控制回路，还包括调速控制回路。

主传动系统　风机泵类机械所用的电动机，普遍为感应电动机。这是因为感应电动机结构简单、运行可靠、维护方便、价格便宜。随着电力电子器件和变流技术、控制技术的发展，感应电动机的调速技术已经成熟，能满足风机泵类负载调速节能的要求。

风机泵类电力拖动主传动系统主要方案有变极对数调速拖动系统、串级调速拖动系统、变频调速拖动系统和大功率无换向器电动机拖动系统。

变极对数调速拖动系统的控制电路简单、占地面积小、维护方便、价格低廉，为有级调速，一般仅有2挡或3挡转速。如果将此系统与定子调压或电磁调速电动机结合起来，可以减少转差损耗，得到在相当范围内能平滑调速且有较高效率的拖动系统。

串级调速拖动系统适用于绕线转子感应电动机。其优点是变流设备容量（转差功率）小，较其他无级调速方案经济；缺点是必须使用绕线转子感应电动机，功率因数低，电动机损耗增加，最高转速降低。已开发出多种改善功率因数的线路。双馈电动机可克服一般串级调速的一些缺点，但变流和控制复杂、成本高。

变频调速拖动系统是一种理想的拖动系统，且可使用笼型感应电动机（或同步电动机），具有串级调速拖动系统效率高的优点。如采用脉宽调制（PWM）变频调速，还可提高系统的功率因数和减小谐波。采用晶体管的PWM电压型交流-直流-交流变频调速可用于100～200kW设备，晶闸管电流型交流-直流-交流变频调速可用于几百千瓦至2000kW大型设备。交流-交流直接变频调速（600r/min以下）可用于几千千瓦以上的特大型设备（同步电动机）。这种拖动系统的控制电路复杂，总投资较高，甚至高达电磁调速电动机的4～5倍。（见变频器、转矩控制、转速控制）

大功率无换向器电动机拖动系统中大功率无换向器电动机（600r/min以上）可用于几千千瓦以上的特大型设备（同步电动机）。某些特大功率（几万千瓦）的风机和泵，虽不调速，但需变频起动装置，也可用大功率无换向器电动机拖动。

电控系统　图1所示为典型的双闭环控制晶闸管串级调速的电控系统原理图。如果对转速变化率没有特殊要求，可以采用开环控制系统，如图2所示，电动机采用频敏变阻器（见变阻器）起动，起动后转变至串级调速，调速由自整角机组成的移相器进行。由于所要求的调速比一般不大于2∶1，故串级调速所采用的晶闸管串级装置的容量一般为电动机功率的30%～50%。

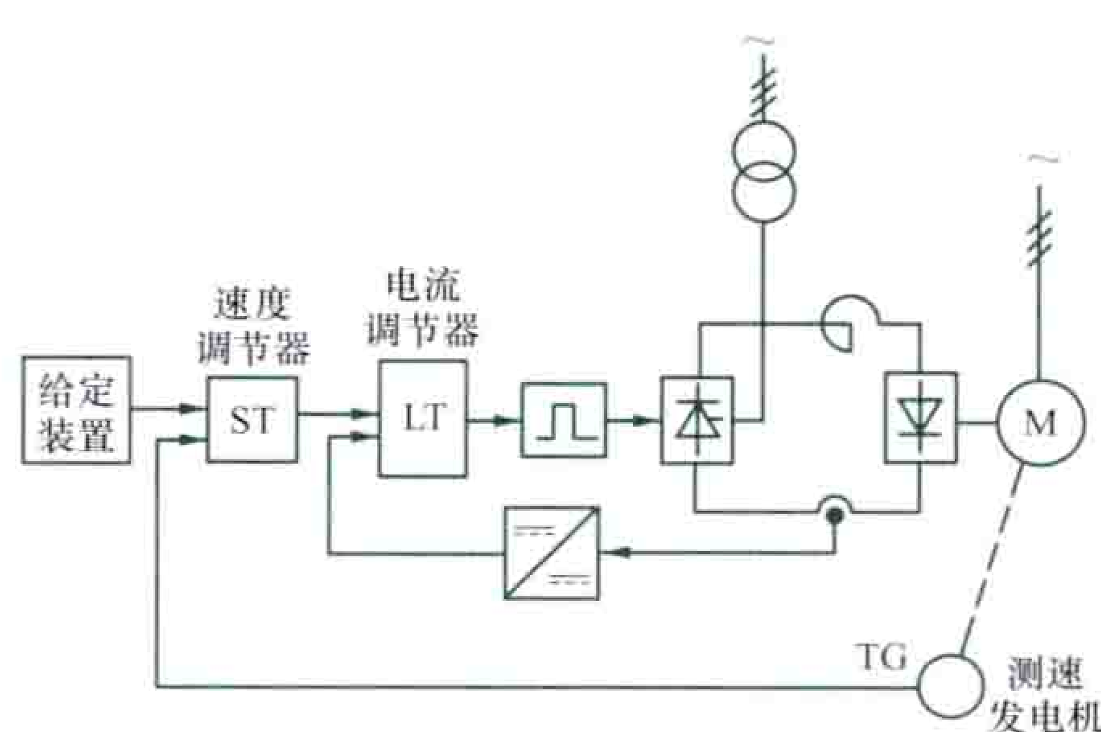


图1　双闭环控制晶闸管串级调速电控系统原理图

图3所示为变频调速电控系统原理图，包括主电路、保护配置、调速控制环节。该系统采用大功率晶体管组成的PWM型逆变器和微处理机编程的正弦波PWM控制，电压和频率同时在逆变器侧加以控制，电流输出波形近似为正

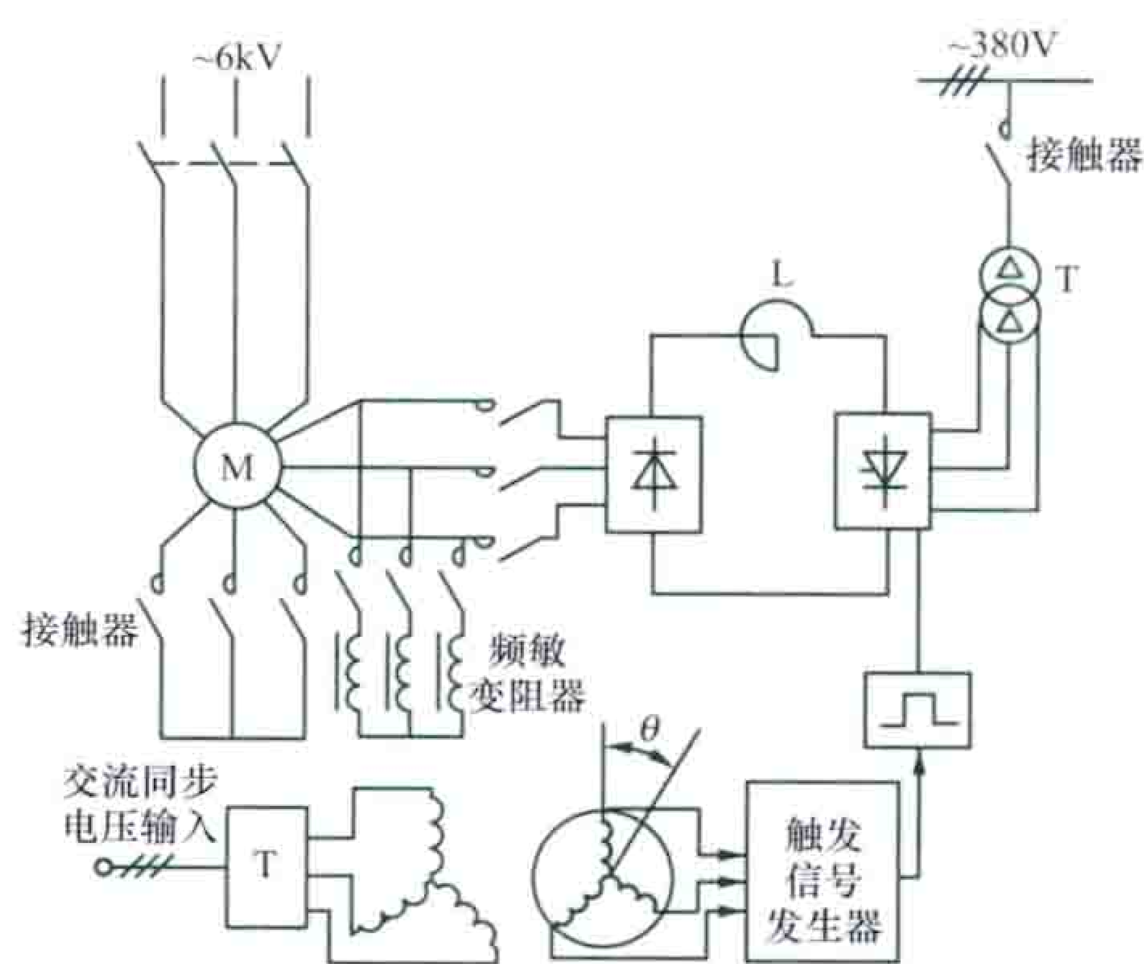


图2　开环控制串级调速电控系统原理图

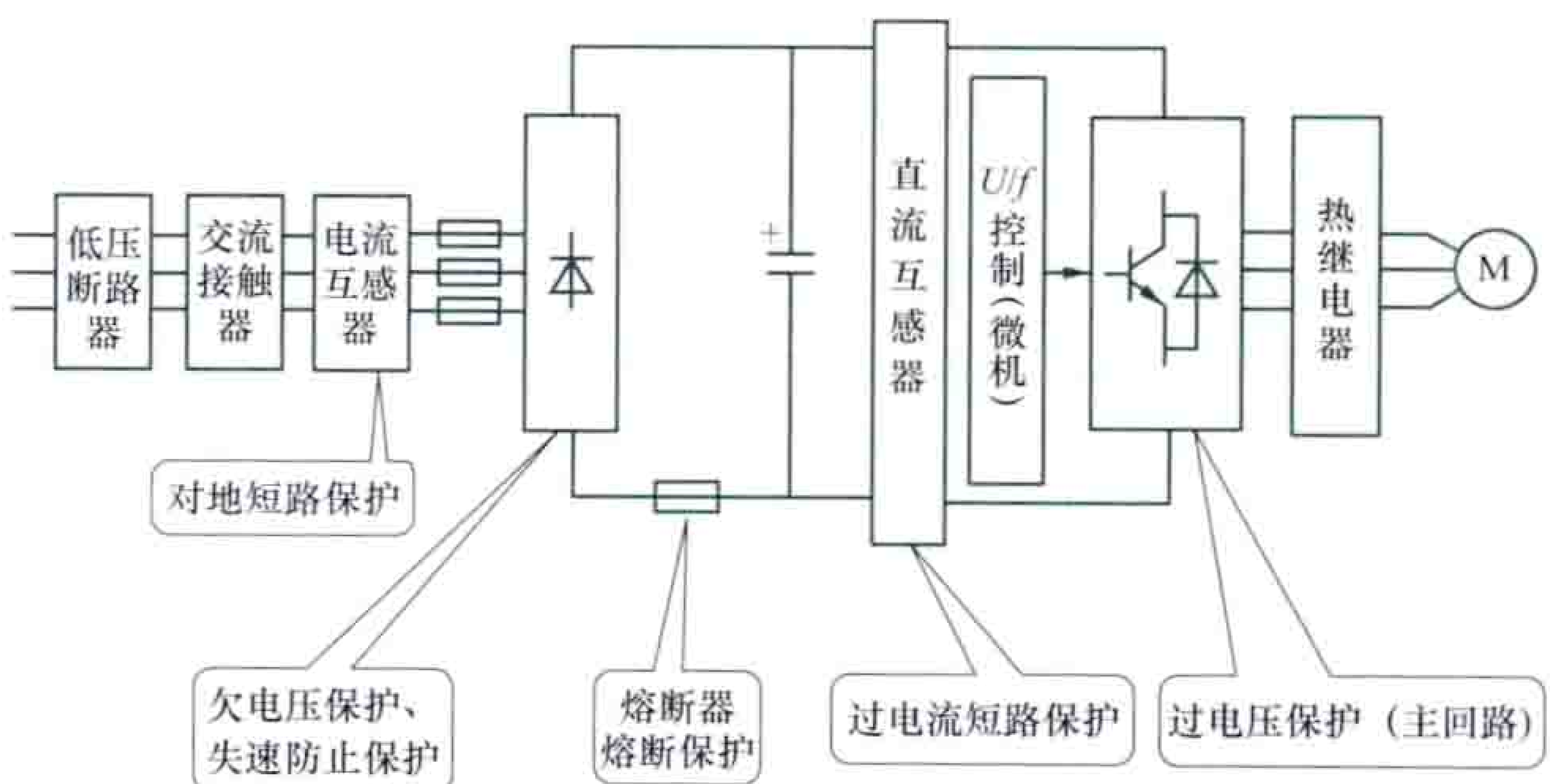


图3　变频调速电控系统原理图

弦波。变频调速电控系统除上述 PWM 型外，还有电压和频率独立控制的交流-直流-交流电压型变频系统和交流-直流-交流电流型变频系统。

fengji jiedian jishu

风机节电技术 (electricity saving technology of fans)

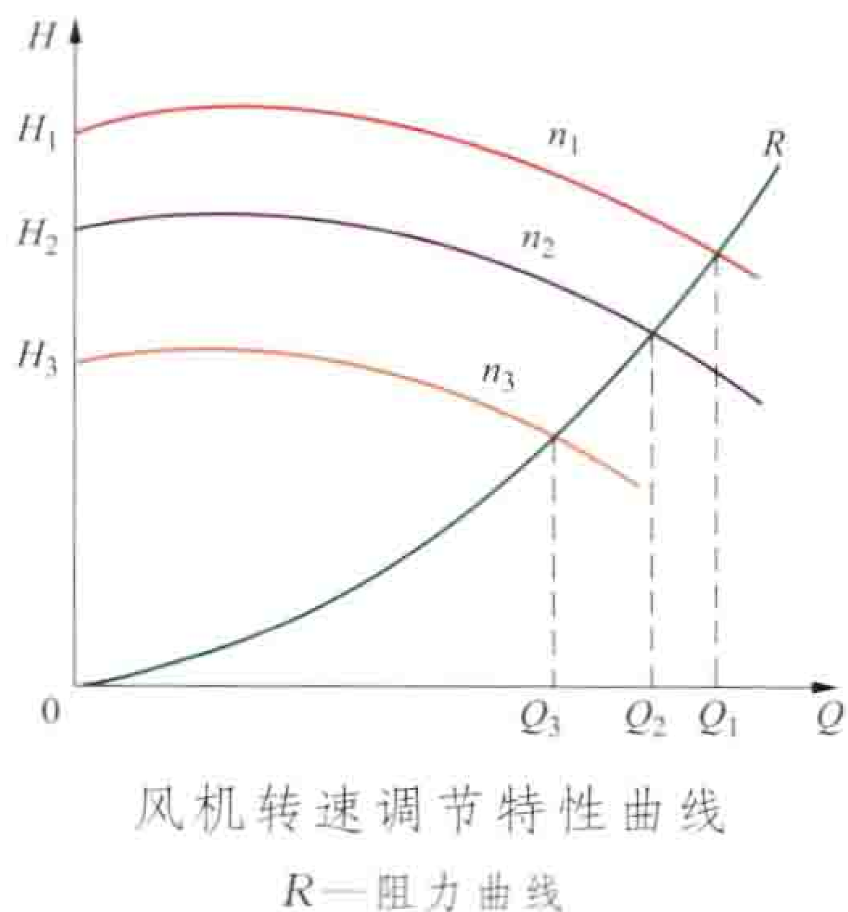
提高风机效率、降低电能消耗的措施与方法。风机是一种通用机械，应用很广，耗电量很大。中国风机总安装功率在 1000 万 kW 以上，年耗电量占全国总用电量的 10.4%。在设计使用中，由于选型不当、管道设计不合理、风机陈旧、运行管理落后等，造成风机使用效率低下（最低仅 20%，高的也只有 60%），浪费了大量的电能。风机的耗电量与风量、风压，风压与风量调节装置的效率及使用时间等有关。

风机按工作原理可分为叶片式风机和容积式风机两大类。工业上通常大量使用叶片式风机，又可细分为离心式与轴流式两种。轴流式风机产生的风压较小，一般只用于通风换气；离心式风机的效率较高，风量大，结构简单，较多用于气体输送。

降低风机耗电量的措施包括合理选配风机、风机调速运行、风机技术改造等。

合理选配风机　①在有条件的地方更换新型风机。②风机的风量与风压应满足生产工艺的需要，尽量选用高效风机。③风机的参数应满足生产工艺的需要。若风机参数选配不当，风量或风压偏低，会引起产品产量或质量下降；风量或风压裕量过大，起动调节装置时将导致风机效率下降，造成电能浪费。④风量在较大范围变动或对供风系统可靠性有较高要求时，可选配 2 台及以上特性相同的风机并列运行，并配以节能型的调节装置。当负载变化时，先停开风机台数进行风量的粗调，再用调节装置进行细调，使风机始终保持在高效区运行。

风机调速运行　在风机其他条件不变的前提下，风机的风量与转速成正比，即 $\frac{Q_1}{Q_2}=\frac{n_1}{n_2}$；风机的风压与转速的二次方成正比，即 $\frac{H_1}{H_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$；风机消耗的功率与转速的三次方成正比，即 $\frac{N_1}{N_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$。其中 n 为转速；Q 为风量；H 为风压；N 为功率。因此，用改变电动机转速的方法来调节风机的风量和风压，节电效果较好。风机转速调节特性曲线见图。几种常见的风机调速方法及技术经济指标比较见表。



风机转速调节特性曲线

R—阻力曲线

风机技术改造　主要从改变风机叶轮外径、改变风机叶片的材质、减少风道阻力、增加调速装置等方面进行。

(1) 改变风机叶轮外径。改变风机叶轮外径可以改变风机的风量、风压和轴功率。风量需减少 10%～20%时，可采用车削叶轮的方法来改造风机。同一台风机叶轮车削后，流量、全风压、轴功率分别与叶轮外径三次方、二次方、五次方成正比。

几种常见的风机调速方法及技术经济指标比较

项目	方案					
	变极	液力联轴器	转子串电阻	直流	变频	串级
适用电动机	笼型异步电动机	笼型异步电动机、绕线转子异步电动机	绕线转子异步电动机	直流电动机	笼型异步电动机、绕线转子异步电动机	绕线转子异步电动机
主要设备	开关	液力联轴节控制装置	转子电阻及冷却油	晶闸管整流装置	晶闸管变频装置	晶闸管串级调速装置
节电效率	最高，但仅有三级风量变化	最低	最低	较高	较高	较高
功率因数	高	高	高	较高	较高	低
风量可调节范围（%）	0，50，100 三级	30～97	40～100（有级）	0～100	0～100	40～100
结构	简单	简单	简单	一般	复杂	一般
主要维修项目	无	油、冷却器	集电环、油	电刷	无	集电环

(2) 改变风机叶片的材质。如用玻璃钢叶片取代钢质叶片。

(3) 减少风道阻力。尽量减少各种弯头，分支管越少越好，避免直角和“Z”形管道，拆除多余的挡板，保持叶片清洁，清扫风道积灰，堵塞风道漏风，选择节能型风门等。

(4) 增加调速装置。

fengbishi kaiguangui

封闭式开关柜 (enclosed switchgear cubicle)

除进、出线外所有元件都完全安装在封闭的接地金属外壳内的开关柜，又称金属封闭开关设备。封闭式开关柜包括固定式开关柜和移开式开关柜两种，移开式又包括手车式和抽屉式，按其结构不同还可分为金属铠装式、间隔式及箱式 3 种。

金属铠装式封闭开关柜各组件按一定组合方式分别装在以接地金属板隔开的间隔中，其中断路器及连向断路器两侧的组件（如直配线路、母线等）一般均设置在单独的间隔中；如有多组母线，将每组母线分别设置于单独的间隔中。金属隔板有不同的防护等级，但用于静触头的隔板或能插入动触头的活门，可以是金属的，也可以由非金属绝缘材料制成，它不属于外壳的一部分。

间隔式封闭开关柜与金属铠装式封闭开关柜基本相同，但具有一个或多个符合一定防护等级的非金属隔板。

箱式封闭开关柜是不设隔板或少设隔板的金属封闭开关设备。它具有金属接地外壳，在规定的防护等级下，保护内部设

备不受外界影响，防止人体和外物接近带电部分和触及运动部分，但间隔的数目少于金属铠装式和间隔式封闭开关柜。

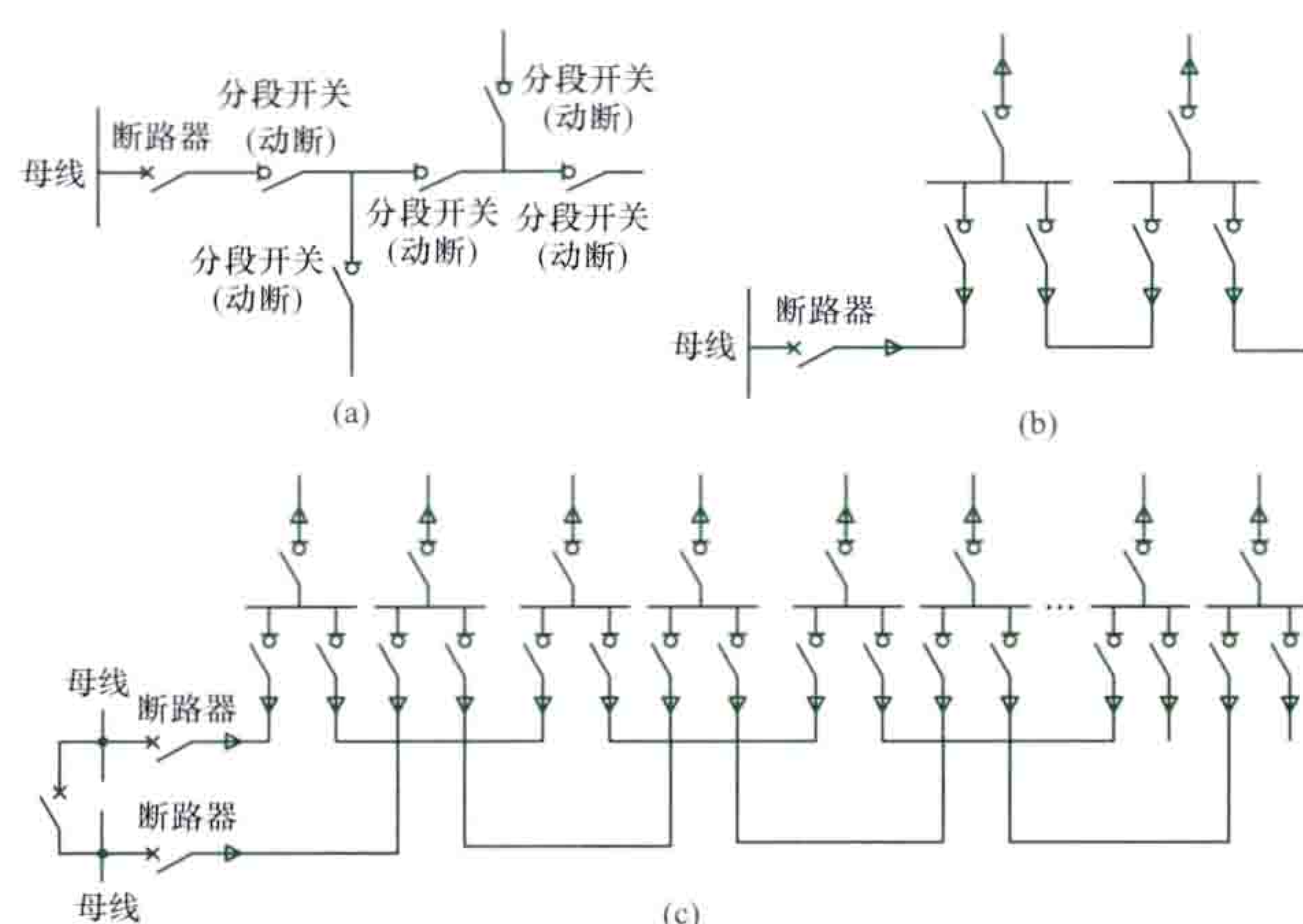
封闭式开关柜在保持良好的导电性和绝缘性能基础上，还要满足外壳和隔板的防护等级要求；控制内部各种电器元件动作、状态保持和相互工作顺序的机械传动、锁定及联锁装置；能够限制内部电弧故障的扩大；便于使用时的操作、观察、维护、检修以及安装和调试；具有多种一次电气主接线方案，可满足电力系统中各种电气主接线要求。

fushexing wangluo

辐射形网络 (radial power distribution network)

自一个供电点或母线引出，按负荷的分布情况，呈辐射状延伸出去的配电网络。辐射形网络是配电网的一种常用的接线方式，其接线简单清晰，运行维护方便，建设投资小，还便于负荷的发展。只要不超过线路的额定容量并在满足电压质量要求的情况下，配电线路就可以逐步延伸，以适应新增用电负荷的需要。辐射形网络中所有用电点的电能只能通过单一的路径供给。

辐射形网络可分为单辐射形和双辐射形两种。单辐射形网络既可用于架空线路，又可用于电缆线路，如图（a）和图（b）所示。它的缺点是当线路或设备故障、检修时，用户停电范围大，供电可靠性较差，一般适用于低负荷密度区和非重要用户。对于架空线路辐射形网络，在主干线上装设分段开关将线路分成适当区段，当线路或设备发生故障时可缩小停电范围。双辐射形网络适用于电缆线路，如图（c）所示，正常运行时，由其中一条线路供电，当供电线路或设备发生故障时，可切换到另一条线路运行，供电可靠性高。



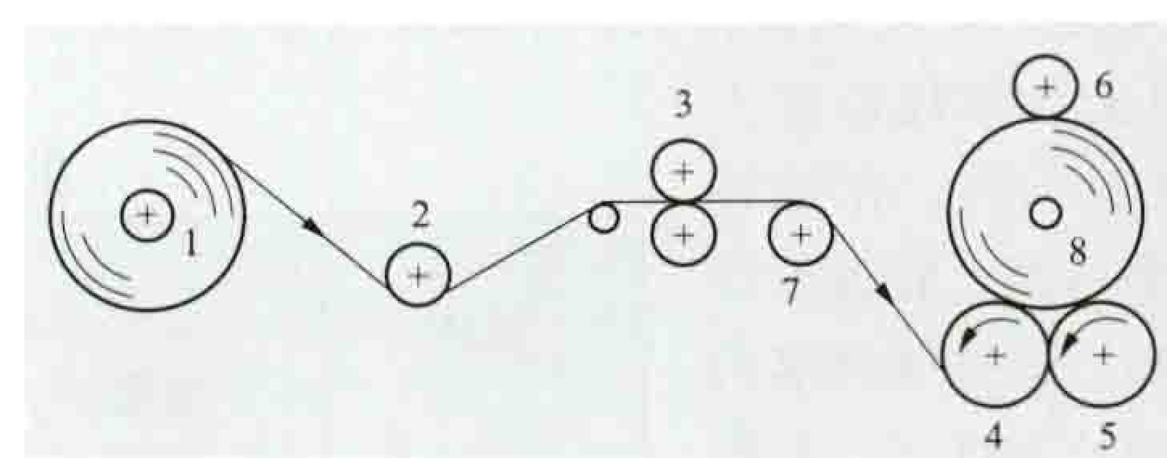
辐射形网络示意图

（a）架空线路单辐射形网络；（b）电缆线路单辐射形网络；（c）电缆线路双辐射形网络

fujuanji diankong xitong

复卷机电控系统 (electric drive control system for recoiler)

用以实现复卷机正常运转的电力拖动和控制等电路组合的总体。复卷机是将造纸机所生产的原纸卷，经过定宽分切、整理、再复卷成里外紧度均匀合适的成品纸卷的机器。复卷机一般由退纸辊、引导辊、纵切装置、卷取辊等构成，如图所示。各组成部分都由独立的电动机传动。原纸卷放在退纸辊上，通过引导辊到达纵切装置，纵切圆刀将纸分裁成所需宽度，然后送到卷取辊进行复卷，达到规定长度后即停下来，再换上新的纸芯重复上述过程。复卷机电控系统主要用于在复卷过程中维持纸的张力恒定，使纸卷的紧度里外均匀。为提高纸卷质量，对于高速的复卷机除了控制纸的张力恒定外，还要控制压纸辊的压力和两个底辊间的转矩差。



复卷机的构成示意图

（"+"号表示电动机的传动点）

1—退纸辊；2—引导辊；3—纵切圆刀；4—后底辊；5—前底辊；6—压纸辊；7—张力辊；8—卷取辊

（1）张力控制。纸的张力控制有多种方法，主要为电气控制。电气控制又分为间接张力控制和直接张力控制。间接张力控制即控制退纸辊电动机的制动功率，使之恒定。常见的控制方法是使电动机反电动势恒定和电枢电流恒定，也可以使电动机的反电动势和电流可变但其两者的乘积恒定。用间接张力控制在升速及降速期间要进行动态力矩的补偿，以获得较高的张力控制精度。直接张力控制是用张力计直接测量纸张的张力，构成张力闭环控制，保持纸张的张力恒定。

（2）压力控制。纸卷和底辊间的压力控制是通过控制压纸辊液压缸的压力来实现的。随着纸卷直径逐步加大，逐步减小压纸辊液压缸压力，从而获得均匀压力。

（3）转矩差控制。两个底辊间的转矩差应随着纸卷直径的加大相应变化，前底辊转矩逐渐减小，后底辊转矩逐渐增大，从而得到较理想的成品纸卷。为达到此要求电控系统设有转矩差调节器。

复卷机的电控系统，一般采用晶闸管相位控制直流调速或交流变频调速反并联可逆系统。它具有快速制动性能，可使复卷机的最高速度设计为对应纸卷机最高速度的2～3倍，具有最高速度2%～3%的引纸速度，以及平滑过渡的起动、制动特性。



ganshouqi

干手器 (electric hand dryer) 公共场所或家庭内，用于洗手后吹干湿手的电热器具。干手器（见图）主要由壳体、电动机、风叶、加热元件和控制器件等组成。通过控制器件，使电动机和加热元件通电后，电动机带动风叶转动，吸入冷空气，经加热元件迅速加热后，从出风口送出热风，将湿手吹干。



干手器

按控制方式可分为手动式和自动式两种。手动式干手器装设有按钮或脚踏开关控制其通断，这种干手器的控制机构简单，成本较低，已很少应用。自动控制干手器的控制机构可采用电子感应式、光电感应式或超声波反射式等结构，手接近出风口时，自动控制器件使电动机和加热元件通电，送出热风，将湿手吹干，手离开出风口后，干手器自动停止工作。自动控制干手器的控制机构较复杂，成本也较高，符合公共场所卫生要求，使用方便。公共场所卫生间主要应用这类干手器。

按干手方式分为加热型和风干型。加热型干手器通常加热功率在1000W以上，而电动机功率只有不到200W，其特点是风温高、干手较慢（一般需要30s以上）、噪声小。风干型干手器的特点是风速高、干手速度快（仅需10s左右）、噪声大。

ganying cuihuo zhuangzhi

感应淬火装置 (induction hardening installation) 供机械零件表面淬火用的感应加热设备。利用交变电流的趋肤效应，采用感应加热的方法使钢质零件表面层受热并随后冷却淬火（如图1所示），使零件表面有高的硬度和抗疲劳强度，而中心仍保持原有的韧性。很多机械零件，如齿轮、轴、销、曲轴等要求具有这种性能。

感应淬火加热的理论计算很复杂。现场操作感应淬火装置常利用现成的图表——淬火深度、电源频率、单位表面输入功率、加热时间的关系图或表，选择工作参数，并辅以必要的试验校正。

特点 与利用火焰加热的表面淬火比，感应淬火的优点有：①热量在工件自身产生，因此能耗小，热效率高；②加热和冷却快，工件变形少，氧化脱碳少，淬火后不需要再进行机械加工，可节省加工费用；③易于组织在生产线中实现批量生产；④无废气，对环境污染少。缺点是：①要用一定频率加热，且感应器通用性差，设备适用面较窄；②中、高频电源会对无线电产生干扰，须加防护。

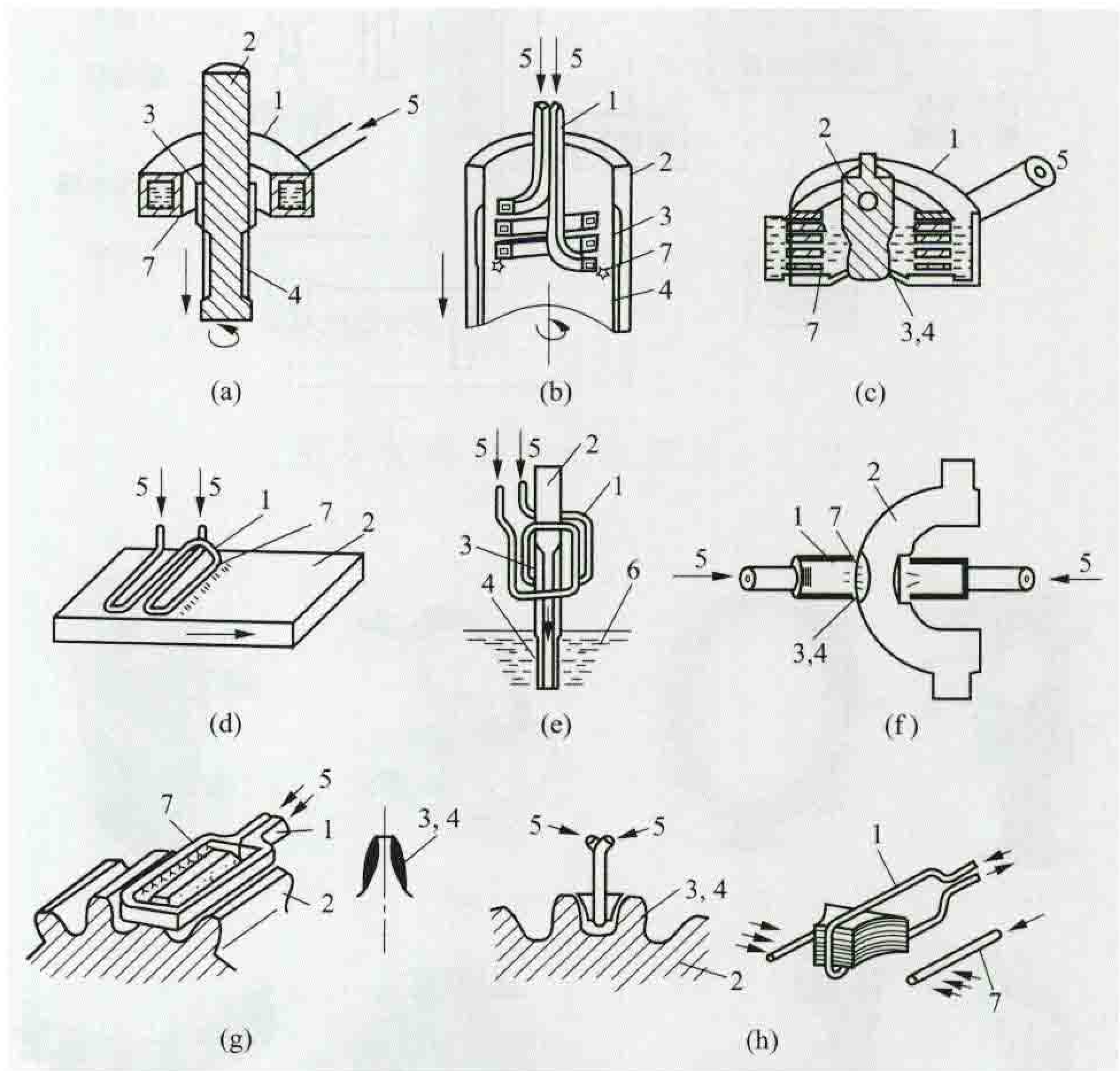


图1 感应淬火示意图

(a) 轴的淬火；(b) 套筒内壁的淬火；(c) 球头的淬火；(d) 长板的淬火；(e) 锯条的淬火；(f) 曲轴的淬火；(g)(h) 齿轮的逐齿淬火

1—感应器；2—工件；3—加热层；4—淬火层；5—冷却水；6—淬火油；7—冷却水喷射孔

应用 感应淬火装置广泛用于汽车、铁路、农机、建筑机械、机床、轴承、电器等制造业中。齿轮类等形状复杂零件的淬火通常采用双频感应淬火。20世纪90年代前，传统齿轮双频感应淬火采用两种电源分别在两个感应器内进行预热及淬火，其后新的齿轮双频感应淬火采用两种电源在一个感应器中进行加热淬火，亦称SDF。随着晶体管超音频电源的发展，一种用于中、小模数齿轮的超音频全齿廓淬火技术得到推广，选择合适的频率（20～70kHz），能一次获得沿整齿廓的均匀淬火层。

装置构成 感应淬火装置由电源、淬火机床、控制系统，以及附属的冷却水、淬火液循环装置等组成。电源可分为工频、中频或高频（见电炉变频电源），一般按工件的淬火深度要求选择，淬火层愈浅，电源频率愈高。电源输出端配有二次电压可调的淬火变压器，用来降低电压以满足感应器的低电压输入要求。淬火机床主要由机身、感应器、工件夹持和传动系统等组成，如图2所示。感应器通常用裸铜管绕成，只有1匝或几匝，表面一般不做绝缘处理。机器零件的表面淬火用感应器多数采用仿形结构，如图3所示。感应器常兼作冷却水喷淋器，供工件加热后水淬，也有用油、盐水、合成淬火剂或流动空气等淬火的情况。真空高压淬火炉如图4所示。

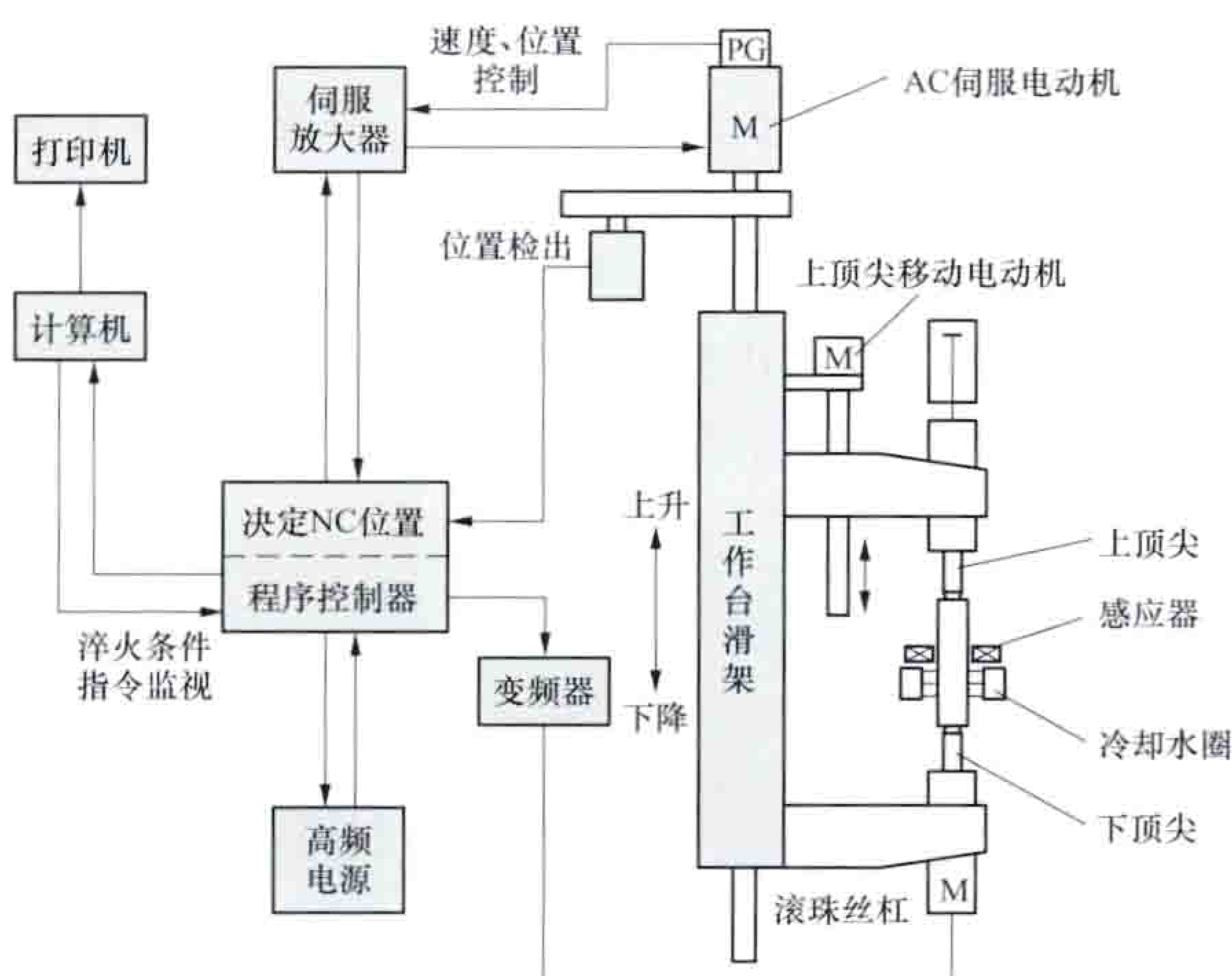


图 2 通用淬火机床传动系统

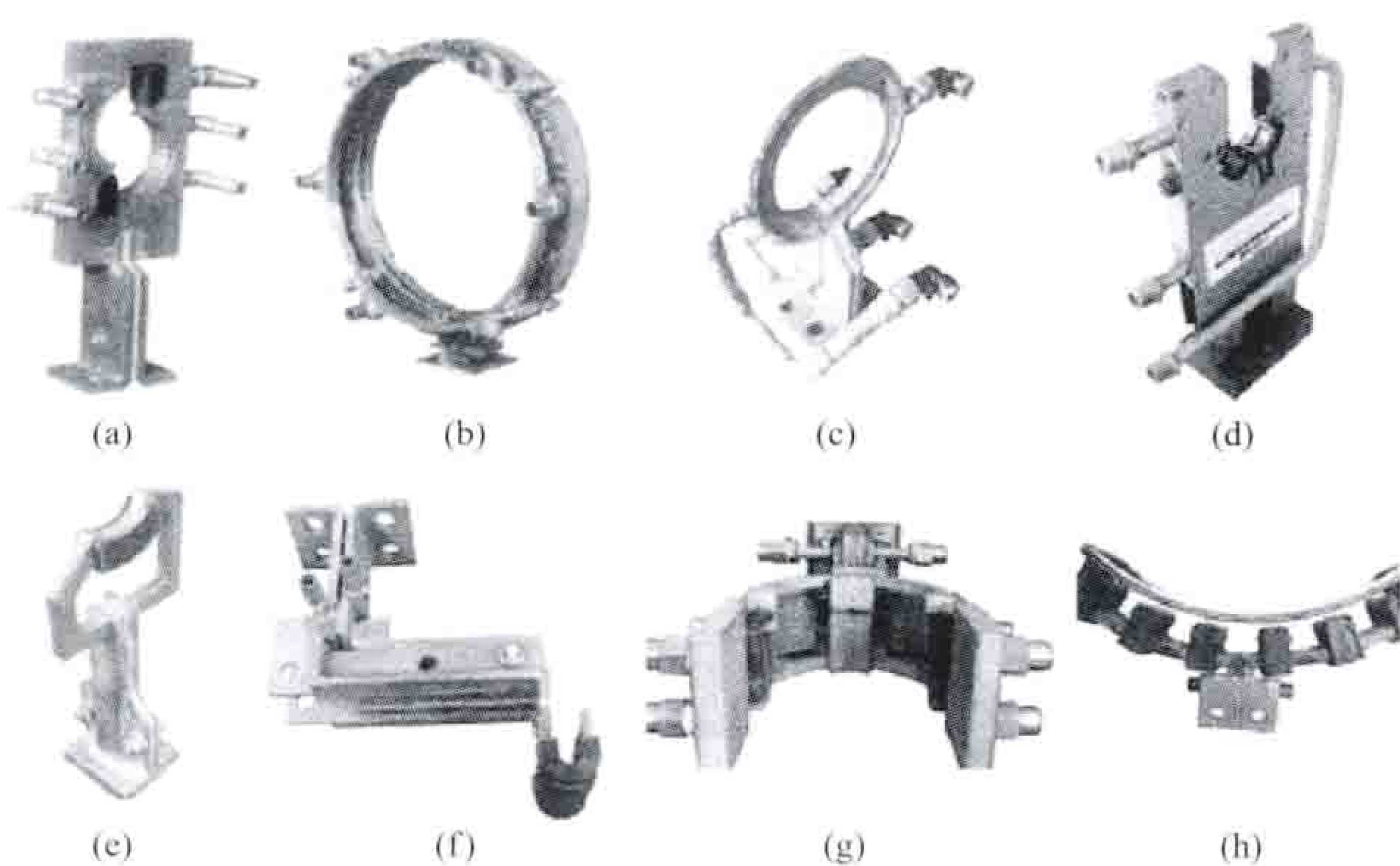


图 3 淬火感应器

(a) S形凸轮感应器；(b) 齿圈感应器；(c) 曲轴法兰感应器；(d) 曲轴感应器；(e) 弧面感应器；(f) 制动蹄片感应器；(g) 台阶轴感应器；(h) 五齿块感应器

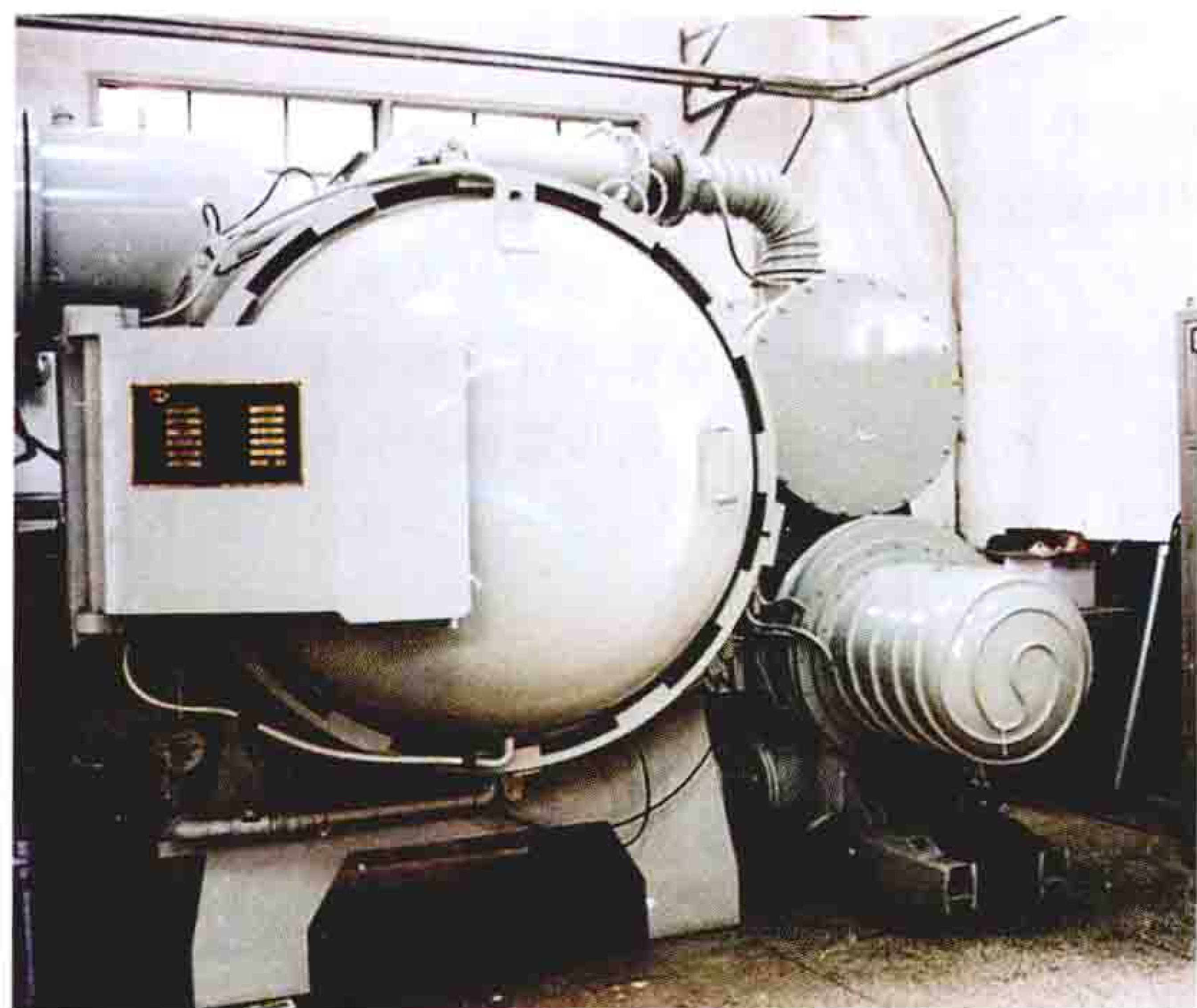


图 4 真空高压淬火炉

感应淬火装置可分通用设备和专用设备两大类。通用设备配备有许多可拆换的感应器，适用于多种工件的淬火，一般设在工厂的热处理车间。专用设备设置在生产线上。

参考书目

沈庆通，梁文林．现代感应热处理技术［M］．北京：机械工业出版社，2008.

ganying diandongji

感应电动机 (induction motor) 定子绕组连接至交流电源，利用电磁感应作用在转子内感应电流实现机电能量转换的交流电动机。感应电动机运行时的转速与所接电网频率之比不是恒定值，总是略小于同步转速 n_1，故又称为异步电动机（见图 1）。按供电电源相数分为三相和单相感应电动机；按转子形式分为笼型感应电动机和绕线转子感应电动机。



图 1 交流异步电动机

感应电动机的主要优点是结构简单、制造容易、价格低廉、坚固耐用和运行可靠等。它的主要缺点是：功率因数较低，必须从电网吸收无功功率；调速特性较差，不能经济地实现范围较广的平滑调速。

结构 定子和转子铁芯一般都由 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成。定子冲片内圆和转子冲片外圆都冲有一定形状的槽，分别嵌放定、转子绕组。定、转子间的气隙很小，中、小型感应电动机一般为 0.2～2mm。

工作原理 当定子三相对称绕组接到频率为 f_1 的三相交流电源时，流入定子绕组的三相对称电流就会在气隙内产生一系列的气隙旋转磁密。其中起主要作用的是以同步转速 $n_1=60f_1/p$ 顺着绕组相序旋转的基波气隙旋转磁密，其中 p 为电动机极对数。图 2 所示是一台 2 极感应电动机工作原理示意图。为便于理解，基波气隙旋转磁密用一对以 n_1 旋转的 N、S 磁极表示，转子绕组仅画出组成回路的一对导体。在图 2 所示瞬间，转子导体切割气隙旋转磁密而感应电动势，按右手定则，其方向如图中⊕（表示进纸面）和⊙（表示出纸面）所示。由于转子导体通过端环自行闭合，在转子绕组中将有电流流过。假设导体中的电流方向与感应电动势的方向相同，这时，转子载流导体与气隙旋转磁场相互作用，将会产生电磁转矩 T 作用在转子上。按左手定则，电磁转矩的转向与气隙旋转磁密转向相同，如果这个电磁转矩能克服电动机的空载转矩和起动时的负载转矩，转子就能旋转起来，并加速旋转，直至电磁转矩等于负载转矩时，转子就以恒速 n 运行。正常运行时，感应电动机的转速总是稍低于同步转速。若转速达到同步转速 n_1，则转子导体和气隙旋转磁密之间就没有相对运动，转子导体中将不产生感应电动势和电流，电磁转矩将变为零，于是转子转速将自动下降，在某一个低于 n_1 的转速下运行。

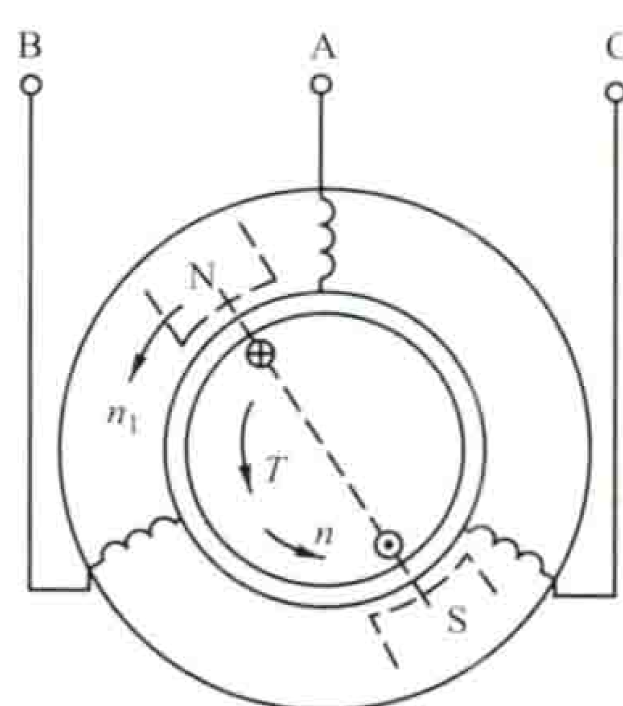


图 2 感应电动机的工作原理示意图

同步转速 n_1 和电动机转子转速 n 之间的差值与同步转速 n_1 的比值叫做转差率，也叫转差或滑差，用 s 表示，即

$$s=\frac{n_1-n}{n_1}$$

s 的大小能反映电动机转子的转速。

调速 感应电动机的转速为

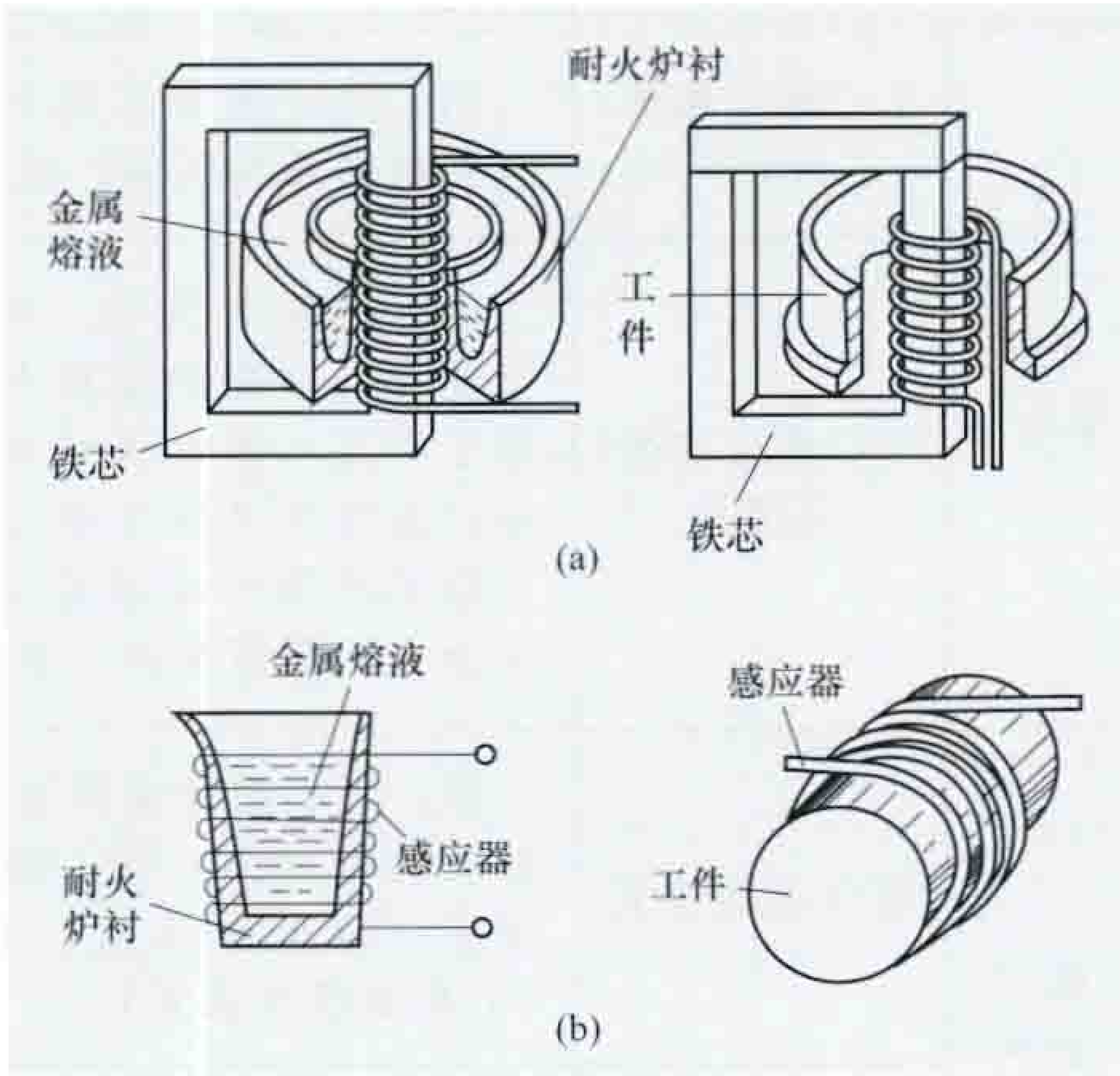
$$n=n_1(1-s)=\frac{60f_1}{p}(1-s)$$

由上式可知，感应电动机的三种调速方法是改变转差率 s、绕组极对数 p 和供电电源频率 f_1。

ganying jiare

感应加热 (induction heating) 利用电磁感应原理在导电物料中产生的感应电流的焦耳热而对物料进行的电加热。处于交变电磁场中的导电体内部会产生感应电动势并形成感应电流，该感应电流因导电体的电阻而产生焦耳热，从而使导电体得到加热。在感应加热的应用中，交变电磁场是由通交流电流的感应器产生的，导电体即为被加热的可导电炉料。感应加热的过程主要遵循电磁感应、集肤效应和热传导三项基本原理，由此建立的电磁场和热力场数学模型构成了感应加热分析计算和设计的基础。

分类 感应加热根据其加热系统是否有铁芯可分为有心式感应加热和无心式感应加热，见图 (a) 和图 (b)。前者如同一个单相变压器，感应线圈是一次绕组，被加热炉料配置成二次闭合回路并套在铁芯上；后者的炉料置于感应线圈内，线圈通交流电时，在炉料中产生的感应电流使其加热。根据感应电流产生焦耳热的过程发生在炉料自身内部或外部，又分为直接感应加热和间接感应加热。对间接感应加热，焦耳热发生在炉料外部的媒介物（如石墨坩埚和铁坩埚）中，然后再通过传热把热量从该媒介物传递给炉料。根据磁通平行或垂直于炉料主轴还可分为纵向磁通感应加热和横向磁通感应加热。



感应加热示意图
(a) 有心式；(b) 无心式

主要参数 感应加热的主要参数有电流透入深度、单位加热功率和加热电流频率。

电流透入深度 由于集肤效应，感应加热时在被加热物体即炉料上产生的感应电流，表面最大，愈向中心愈小。若表面处的电流强度为 I_0，沿深度方向某处的电流强度为 I_r，在工程计算时规定 $I_r/I_0=1/e$（e 为自然对数的底）处的深度即为电流透入深度 δ。在电流透入深度层内产生的热量占总热量的 86.5%。δ (cm) 可用下式表示，即

$$\delta = 5030\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$$

式中 ρ 为炉料的电阻率，Ω·cm；μ 为炉料的相对磁导率；f 为交变电磁场或加热电流的频率，Hz。当电阻率 ρ 和相对磁导率 μ 一定时，f 愈高则加热层愈薄。

单位加热功率 决定感应加热速度的最基本参数是单位加热功率 P_0，$P_0=\frac{W}{S}=k_0 I_i^2\sqrt{\rho\mu f}$，式中 W 为炉料表面所得到的功率，kW；S 为炉料的表面积，cm^2；k_0 为系数，由感应器和炉料的几何尺寸决定；I_i 为感应器的电流，A；ρ、μ 和 f 的含义同上。$\sqrt{\rho\mu}$ 通常称为吸收因子，它反映材料在一定温度下对电磁能的吸收能力。在 I_i 和 $\sqrt{\rho\mu}$ 相同的条件下，增加频率会使炉料吸取更多的功率。

加热电流频率 感应加热时应根据炉料的加热目的选择加热电流的频率。整个炉料均匀加热时选用较低的频率，以便增大电流透入深度；用于表面淬火加热时，则采用较高频率。从高效加热的观点看，炉料处于最大吸收功率时的电流频率应该是最佳的，这时感应线圈具有高的电效率。分析表明，对于直径为 $2a$ 的圆柱形被加热物体，当 $2a/\delta\approx3.5$ 时吸收功率达到最大，降低频率使 $2a/\delta<3.5$ 并不能使有效加热层增加，反而使吸收功率急剧下降，由此算出加热电流的频率下限 $f_{min}\approx7.75\times10^7\frac{\rho}{\mu a^2}$ (Hz)。由于 ρ 值随温度升高而增大，μ 值在高于失磁点（居里点）温度时急剧下降为 1，所以随着炉料温度的升高，f_{min} 也应该增大，通常采用的加热电流频率为 f_{min} 的 3～5 倍。实际应用中的电流频率只能从现有的电源频率中进行选择。在满足加热要求的条件下，最方便的是选用工频，必要时才选用中频或高频（见电炉变频电源）。

特点 包括：①热能在炉料内部产生，加热速度快，热效率高；②易于实现对炉料的表面加热和局部加热；③用于机械零件热处理时，加热时间短，金属氧化少；④用于金属熔炼时，熔液可得到电磁力的搅拌，有利于金属温度和合金成分的均匀；⑤易于实现生产过程的自动控制。但感应加热设备投资较大，电效率较低，当使用中、高频加热时会对电网和无线电通信产生干扰，须加以防治。

应用 感应加热的主要应用领域见表。其装置包括各种感应熔炼炉、感应透热装置、感应淬火装置、真空感应烧结炉等。感应加热也存在于工作在交流的电动机、发电机和变压器等电器的铁芯以及通交流电导体附近的导体中，引起有害的感应发热，必须设法减少和避免。

感应加热的主要应用领域

部门	主 要 用 途
冶金	钢铁和有色金属及其合金的熔炼和保温；金属材料热处理；型材压力加工前的加热；管材生产的感应焊接（见高频焊）；以区域熔炼法或悬浮熔炼法熔炼并提纯半导体或金属材料（见晶体生长炉）
机械制造	机械零件铸造用钢铁材料和有色金属及其合金的熔炼和保温；机械零件的淬火加热，特别是表面淬火加热，及其后的回火、退火、正火等热处理加热；零件热压成型（如精锻、热轧等）前的透热；金属的钎焊和对焊、硬质合金熔焊；机械零件感应加热化学热处理；金属零件的热装配；粉末料真空烧结
轻工业	纤维生产中的各种间接感应加热；一些非金属材料热塑性成型用模具的加热
石油化工	化学反应釜等容器和输液管路等的加热
电子工业	电子管生产中真空处理时的加热
家用	电磁灶

历史与发展 1831 年，英国物理学家 M. 法拉第（M.

Faraday，1791—1867）发现电磁感应现象。随后，楞次（Lenz）和福考特（Foucault）等提出了感应电流的磁通反抗原磁通以及涡流等理论。这些构成了感应加热的理论基础。随着各种中、高频电源以及电热电容器的开发，20世纪20年代起，感应加热在熔炼、透热、淬火和焊接方面的应用日趋成熟。60年代，半导体静止变频器的出现更推动了感应加热的广泛应用，并向大容量、高功率方向发展（见电炉变频电源、感应炉）。

尽管感应加热已应用近一个世纪，但由于它能很好地适应现代生产环境以及结合计算机仿真技术在预测电磁、热和流体动力等效应和被处理工件质量上的应用，感应加热至今仍作为一种创新技术在传统和新的领域不断扩展其应用。

为了解决传统感应加热方式在加热电阻率较小的非磁性金属材料（如铝和铜）时效率很低的问题（只有约50%），21世纪初，采用超导体的直流感应加热技术的研究十分活跃。该技术基于电磁感应原理，让铜或铝锭在由超导线圈产生的强直流磁场中旋转，切割磁力线，从而在铜或铝锭内产生感应电流，进行加热。驱动锭子旋转的电动机功率通过电磁感应在锭子内转变成焦耳热，而产生直流磁场的超导体线圈的功率损耗可忽略不计。2008年由美国某超导公司制造的第一台装置已在德国一铝厂投入工业运行，功率达360kW，效率高达90%，用于铝锭挤压前的加热。该技术因成本较高，推广使用尚需时日。

感应加热在热金属蒸气成型汽车结构件、化学热处理、液态食品和饮料包装、感应耦合等离子体和生物医学（如对磁性移植体进行感应加热来医治癌症等疾病）等领域都有创新性应用。

ganyinglu

感应炉（induction furnace） 利用电磁感应原理对炉料进行加热、熔炼或其他工艺处理的电炉，也称感应电热装置。感应炉（见图1）工作时，由相应输出频率的电源设备供电的感应器产生交变电磁场，使处于感应器内部或邻近的金属物料得到感应加热。



图1 感应炉

类别和用途 感应炉分感应熔炼炉和感应加热装置两大类。感应熔炼炉（见图2）用于炉料的熔炼或保温，炉料最终呈液态状；感应加热装置用于炉料的加热，包括炉料整体均匀加热、表面加热或局部加热和烧结等。感应炉的分类及用途见表1。

装置组成 感应炉由相应输出频率的电源设备、感应器组件、补偿电容器、机械动作和传动设备以及控制系统等组成，前3项构成感应炉的主电路。

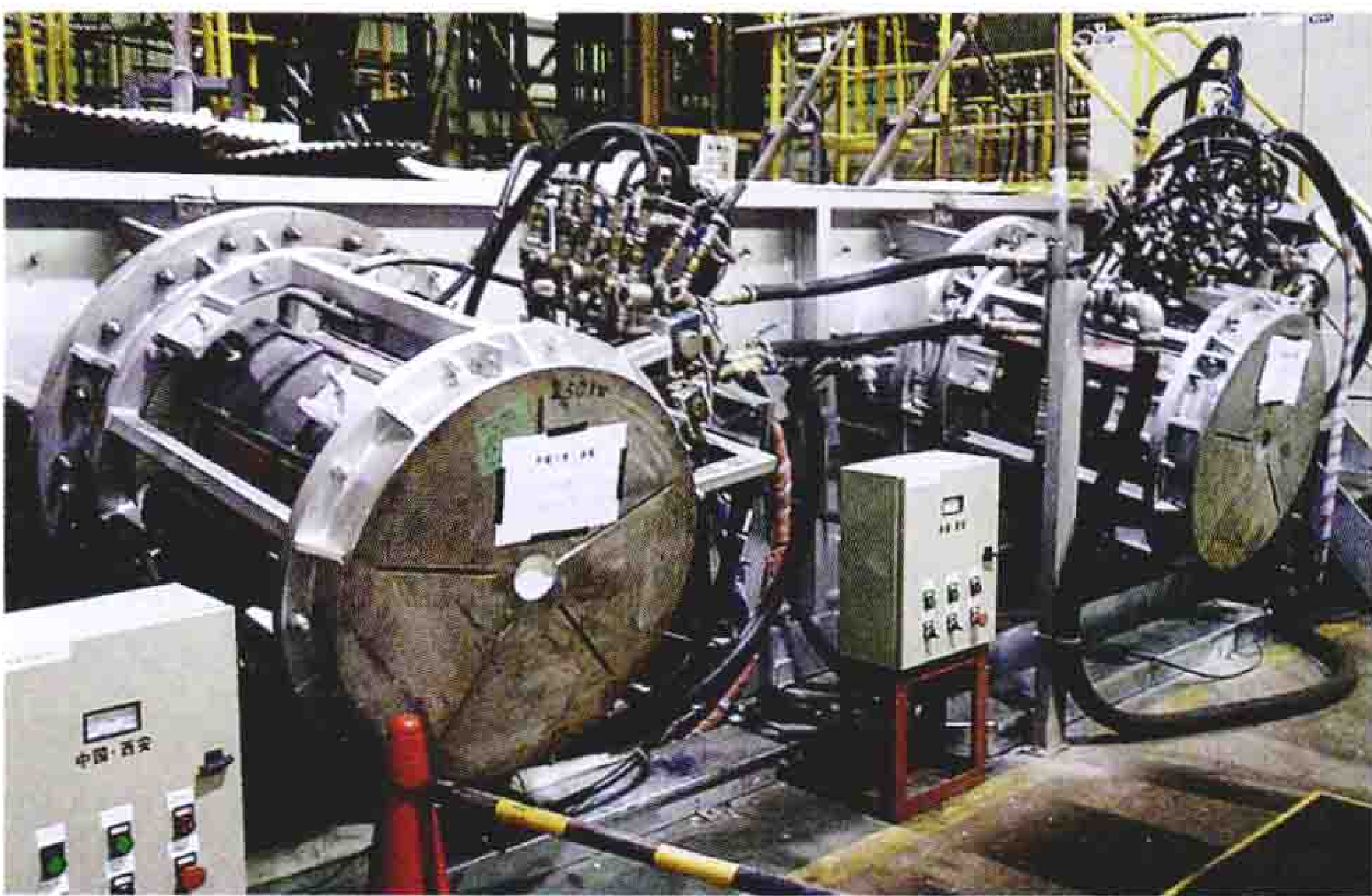


图2 钢带镀锌熔炼炉

表1 感应炉的分类及用途

类别		用途
感应熔炼炉	有心感应熔炼/保温炉	铜、铝、锌等有色金属及其合金以及铸铁的熔炼和保温，铁水和钢水的保温
	无心感应熔炼/保温炉	钢、铸铁以及铜、铝、镁、锌等有色金属及其合金的熔炼和保温。矮线圈炉用于保温；铁坩埚炉用于低熔点合金熔炼；高频炉多用于贵金属熔炼；真空感应熔炼炉用于高温合金、磁性材料、电工合金、高强度钢、核燃料铀等的熔炼
感应加热装置	感应透热装置	钢、铜、铝等金属材料在锻造、轧制、挤压前的加热；钢、铸铁等金属材料的退火、回火和正火；金属零件热装配（见感应透热装置）
	感应淬火装置	机械零件的表面淬火（见感应淬火装置）
	感应烧结装置	粉末冶金坯件的烧结，通常在真空中进行（见真空感应烧结炉）

电源有工频电源、晶闸管中频电源、晶体管中高频电源、电子管高频电源等（见电炉变频电源）。各类感应炉适用的电源频率应根据加热要求按物料的材质、形状、尺寸等选择。单相的工频感应炉由三相供电时，在主电路中要配备相间平衡装置，如平衡电容器、平衡电抗器。

由感应器和炉料构成的加热系统，自然功率因数很低（见表2）。因此，感应器上应并联补偿电容器，把功率因数补偿到接近1，以减少电源和线路的无功负荷。补偿电容器为专门设计制造的电热电容器。中国电热电容器的频率范围为40～24 000Hz，最高电压达3800V，单台最大额定容量达6000kvar。电源、感应器、电容器等之间的线路中的电流很大，设计时应尽可能减小线路电阻和电抗（见短网）。

感应器组件由感应器及其固定装置、隔热和耐火炉衬、磁轭或集磁器等组成。感应器通常用铜管绕制，因受自身电阻热和来自炉料传导热等的加热，应用水冷却。一般用自来水冷却；必要时，用软水甚至蒸馏水闭路循环冷却，可运行在较高工作电压，减少冷却水对铜管的腐蚀，避免因管壁结水垢影响冷却效果。用扁铜带绕制的感应器则用强迫通风冷却。感应器应固定牢靠，运行时不产生变形和松动。隔热和耐火炉衬用以减少炉料散热和防止感应器过热。磁轭或集磁

器用以减少漏磁，防止炉体构件发热并支撑炉体或控制加热部位。

机械动作和传动设备涉及熔炼炉的倾炉以及炉盖的提升和旋开、加热炉的炉料推送等。

控制系统用来调控感应器的输入功率、功率因数的补偿、三相进线的平衡、炉料的温度、加热时间和机械操作等。中、小型设备通常由人工控制或可编程控制器（PLC）自动控制，大型设备多用计算机过程控制。

主要性能参数　反映感应炉内在性能的主要参数有自然功率因数和综合效率。常用感应炉的自然功率因数和综合效率见表 2。

表 2　感应炉的自然功率因数和综合效率

类　别	被加热物料			
	钢、铸铁	黄铜	铜和其他铜合金	铝和铝合金
有心感应熔炼/保温炉	0.7～0.8/0.75～0.95	0.6～0.85/0.7～0.9	0.4～0.5/0.7～0.9	0.2～0.4/0.7～0.9
无心感应熔炼/保温炉	0.05～0.25/0.6～0.7	0.15～0.2/0.5～0.6	0.12～0.18/0.4～0.5	0.12～0.2/0.45～0.55
感应透热装置	0.15～0.4/0.6～0.75	0.15～0.35/0.4～0.5	/0.25～0.35	0.12～0.35/0.35～0.45
感应淬火装置	—/0.5～0.8			

注：分子表示自然功率因数，分母表示综合效率。

历史与发展　1887 年，英国人 S.Z. 弗兰蒂（S.Z. Ferranti，1864—1930）在英国首先取得明沟式有心感应炉的专利，但未得到实际应用。1917 年，美国人 E.F. 诺思拉普（E.F. Northrup）研制出电火花高频振荡电源装置，并依此开发了第一台高频感应炉，用于钢的熔炼。1918 年，美国人 J.R. 怀特（J.R. Wyatt）开发了商品名为 AJAX-WYATT 的"暗沟式"有心感应炉，用于黄铜的熔炼，开创了有心感应炉工业应用的历史。感应炉的发展与中、高频电源的发展密切相关（见电炉变频电源）。20 世纪 20 年代中期，电动发电机组（MG）和电子管高频电源相继问世，有力地推动了中、高频感应熔炼炉和感应加热装置的发展。1932 年，美国 TOCCO 公司开发了高频感应淬火装置。第二次世界大战中，感应透热装置开始用于炮弹生产。第二次世界大战后，工频无心感应炉获得开发，尤以德国技术领先并于 20 世纪 50 年代起在铸造业得到广泛应用，2011 年铸铁和钢的工频无心感应炉最大容量已达 100t（功率为 0.5～21MW）。1958 年，美国 GE 公司研制出晶闸管式变频电源装置，有力地推动了中频感应炉的发展。1958 年，加拿大 P. 柏林格（P. Biringer）发明了三倍频器，在中频加热方面得到小范围应用。20 世纪 70 年代，特别是进入 80 年代后，各种新型晶体管的相继开发及其性能的提高，使晶体管变频电源日趋大容量、宽频域、高效率和长寿命。20 世纪末，中、高频感应炉用变频电源基本上已全部半导体化；工业计算机在感应炉自动化操作、炉况监控、故障诊断乃至工艺过程控制等方面的应用日趋扩大；由一台电源同时向多台感应炉供电的新型电源已取得专利，并在感应熔炼中得到应用。

中国于 20 世纪 60 年代初开始研制工频无心感应炉。1966 年制造出第一台铁坩埚无心工频熔铝炉。1975 年，中国研制了第一台铸铁熔炼用 20t 大型工频无心感应炉，并于 80 年代和 90 年代研制出 45t 铸铁保温有心感应炉和 120t 有心感应化锌炉。20 世纪 70 年代初，晶闸管变频电源获得开发，并已取代了三倍频器和旋转变频机。21 世纪初，大容量中频无心感应炉取得飞速发展，取代了大部分工频无心感应炉，并在特钢熔炼中有逐步取代电弧炉之势，60t/30 000kW 炼钢用中频感应炉和 70t 保温用中频感应炉已投入运行，中频真空感应熔炼炉已形成 0.01～13t 的系列。

ganyingqi

感应器　(inductor)　感应炉的产热部件。由感应线圈及其附件组成的部件，接上电源后产生交变磁场，使其内部或邻近的导体（被加热物料）因产生感应电流而得到加热。（见感应加热）

感应器的形式很多，用于金属熔炼、保温和圆锭透热的感应器多为圆柱形（见图 1），方锭、板坯、棒材端部等透热用的感应器呈方形、矩形或扁圆形。感应淬火用感应器通常只有 1 匝或几匝，形状按照工件淬火需要设计。（见感应淬火装置）

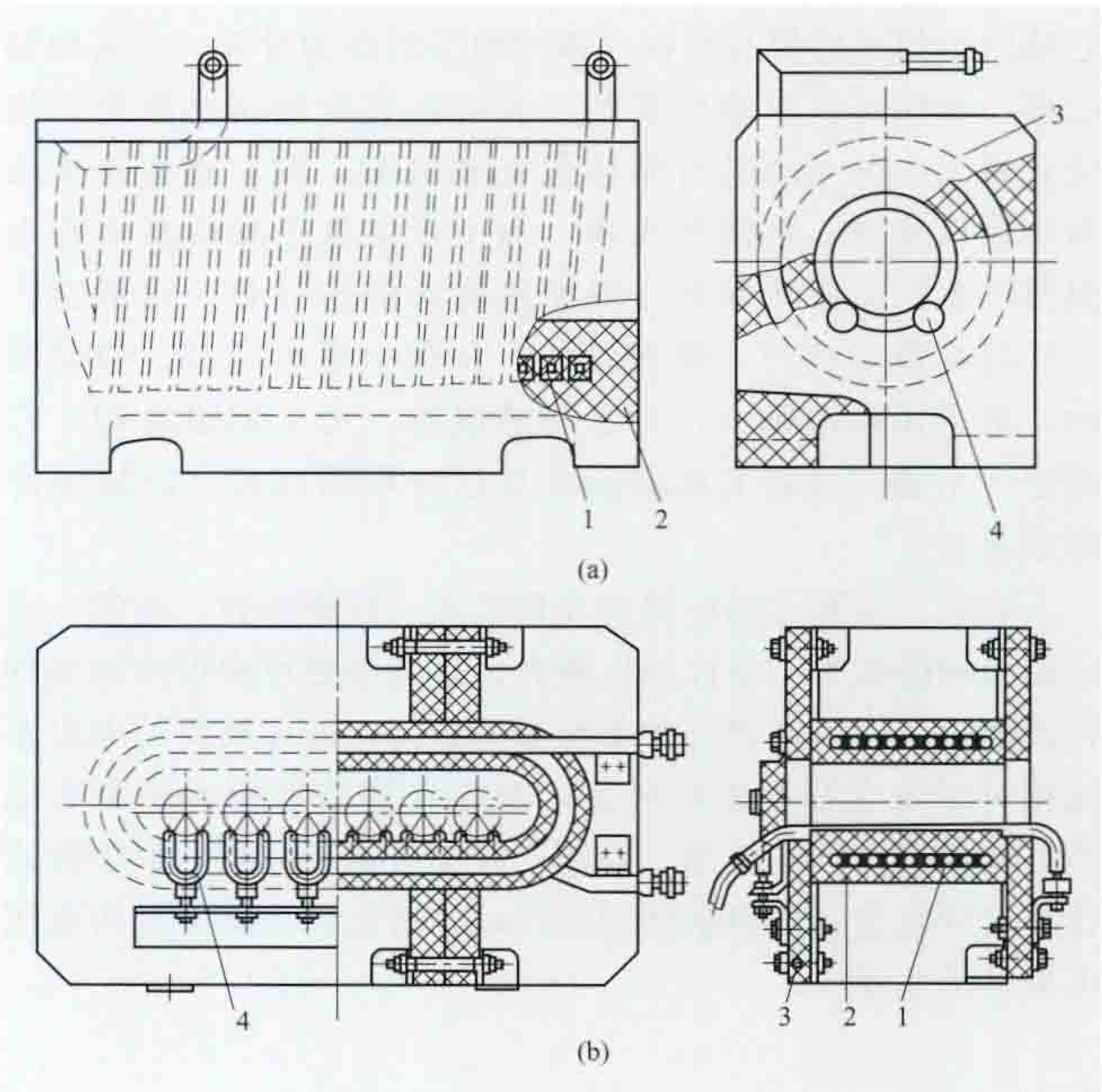


图 1　加热用感应器简图

(a) 圆柱形感应器；(b) 扁圆形感应器（棒材端部加热用）

1—感应线圈；2—耐火材料；3—硬质石棉板；4—水冷导轨

结构　感应器由感应线圈、绝缘件、紧固件等构成。感应线圈用铜材（铜管或铜线）绕制，铜材的截面形状（见图 2）和尺寸的选择取决于电源频率和感应器机械强度等因素。当用于工频时，铜的电流透入深度约 10mm，并且由于圆环效应（趋肤效应的一种表现形式），使用时电流集中在感应器内侧，因此感应线圈用扁铜线或异型铜管绕制，其导电部分宽度约在 10～20mm 范围内。当用于中、高频时，电流透入深度要小得多，考虑线圈的机械强度，仍用壁厚 1～6mm 的铜管绕制。一个感应器通常只有一个感应线圈，

工作时接于电源的单相输出端上，也有2个甚至3个感应线圈的感应器，分别接在电源的两相或三相输出端上。感应线圈的线匝在直径方向通常只有一层，但用于工频有心炉（见感应熔炼炉）和感应透热装置时也有双层或多层的，以减少焦耳损失，提高加热效率。为便于调节输入功率，有些感应线圈设有抽头。为了避免工作中感应线圈和整个感应器因电磁力作用而松动，除小功率者外，感应线圈的各线匝要用绝缘件和紧固件固定，并配用端圈、垫块等使整个感应器平整坚固。除用于高频炉和感应淬火装置的感应器外，其外表通常要经绝缘处理，以避免使用时匝间产生飞弧或短路。处理方法一般是：用绝缘带包扎铜管或铜线；在匝间垫以绝缘块（必要时）；在感应器组装后进行整体绝缘漆浸渍等。有心感应炉的感应器有时在内部用绝缘筒作为骨架。对某些感应器，如用于真空感应炉的，有时在线匝间用能固化的绝缘膏填充，并对它进行整体包扎和涂覆。有的感应器外表面还涂以耐热、防潮等涂料。为了带走由于感应器本身电阻所产生的电阻热和来自被加热物料的传导热，感应器在工作时都需要冷却。用铜管的，在管中通水冷却；用铜线的，则采用强迫风冷。对水冷感应器，为了加强冷却，有时把一个感应线圈的水路分成互相并联的几段，以增加冷却水流量。

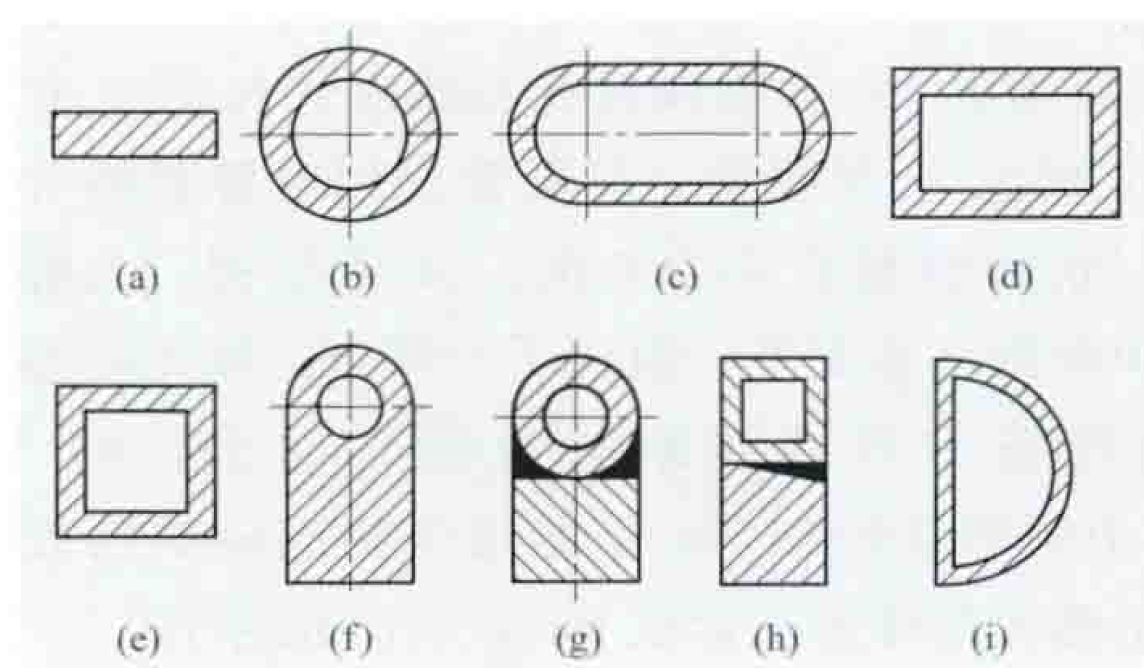


图2 感应线圈用铜材截面

(a) 扁带；(b) 圆管；(c) 扁圆管；(d) 矩形管；(e) 方管；(f) 偏心管；(g)(h) 焊接偏心管；(i) 马蹄形偏心管

参数 主要有感应器的几何尺寸、线圈匝数、电流、电压和功率因数等。设计感应器时，这些参数可根据已知条件计算求得。但由于计算中常作某些假定，如把物料的电阻率和相对磁导率看做是常量等，因此计算结果与实际常有偏差，应根据实际经验加以修正。对淬火用感应器，由于理论计算比较复杂，常根据经验设计，并通过调节感应器的电压来满足加热要求。

ganying ronglianlu

感应熔炼炉 (induction melting furnace) 用于金属材料熔炼或液态金属保温的感应炉。感应熔炼炉和电弧炉是两大类熔炼用电炉。电弧炉用于把杂质较多的原料，通过炉渣或还原剂等与原料的冶金反应炼制出各种钢、铁合金等。感应熔炼炉熔炼时造渣去除杂质的能力不如电弧炉，但其温度和功率容易调节，适用于把杂质少的金属原料（精料）熔炼成优质合金钢、优质铸铁、高温合金、电工合金等。感应熔炼炉特别适合于熔炼铜、铝和锌等有色金属及其合金，在铸造业感应熔炼炉可用作混铁保温炉，在铁合金生产中也已使用感应熔炼炉。

感应熔炼炉分有心感应熔炼炉（又称沟槽式感应炉，见图1）和无心感应熔炼炉（又称坩埚感应炉，见图2）两类。前者适用于单品种大批量金属炉料的熔炼或保温，后者不受炉料品种和批量的限制。



图1 有心感应熔炼炉

感应熔炼炉的规格用其额定容量（单位为t或kg）表示。有心感应熔炼炉由于熔炼后不允许把炉料全部倒完，一般要标出总容量和有效容量。

有心感应熔炼炉 简称有心炉。因为这种感应炉具有由硅钢片叠成的磁路闭合的铁芯，所以叫有心炉。有心炉的炉体由炉壳、炉衬、炉盖、炉膛、熔沟、感应器、铁芯等组成。由耐火材料筑成的炉膛和熔沟相互连通。类似于变压器，感应器是铁芯的一次绕组，而环绕铁芯柱的熔沟中的金属熔液则为二次绕组。当对感应器送电时，熔沟中的金属熔液会因感应电流产生热，并通过对流和传导把热传给炉膛内的金属。

有心炉通常采用工频电源，通过电炉变压器向感应器供电，需配备三相平衡电抗器及电容器。21世纪初，有心炉开始采用变频电源（50～70Hz），通过变频电源向感应器供电，不需配备三相平衡电抗器及电容器。



图2 70t无心感应熔炼炉

有心炉熔沟布置形式有多种，如图3所示。有心炉的铁芯、感应器、熔沟及其外壳常做成一个可拆换的部件，叫感应体。这样既便于把感应体作为通用件而加以系列化，使少数几种感应体能组装成许多不同容量、不同加热要求的炉子，也便于炉子的使用和维护。为了提高熔沟内金属熔液的流动速度，加快热能向炉室的传递，避免熔沟过热、结瘤，实现大功率供电，现代有心炉多采用能够使熔沟内金属熔液单方向流动的喷流型感应体设计，通过增大熔沟出口高度差和变截面形状的熔沟设计等措施增强驱使熔液流动的电磁力，也有用外加磁场等方法的。

熔沟耐火材料不但要承受熔融金属的高温，而且受到因电磁搅拌引起的金属液流的冲刷，工作条件十分恶劣，所以熔沟形状的设计、耐火材料的选择和熔沟的制作都必须仔细、慎重。

有心炉炉体有固定式和倾转式两类。其中小型的，如小型熔铝炉，可由人工用勺出料；大型的，如冶金工业用熔铝炉、熔锌炉则从出料口出料。倾转式炉通过炉体倾转出料，如图3(a)和图3(b)所示。大型炉通常制成滚桶式，如图3(c)所示。专门供金属熔液定量浇铸用的有心炉多数是固定式的，另配有塞杆式、气压式或电磁泵式等定量浇铸机构，如图4所示。

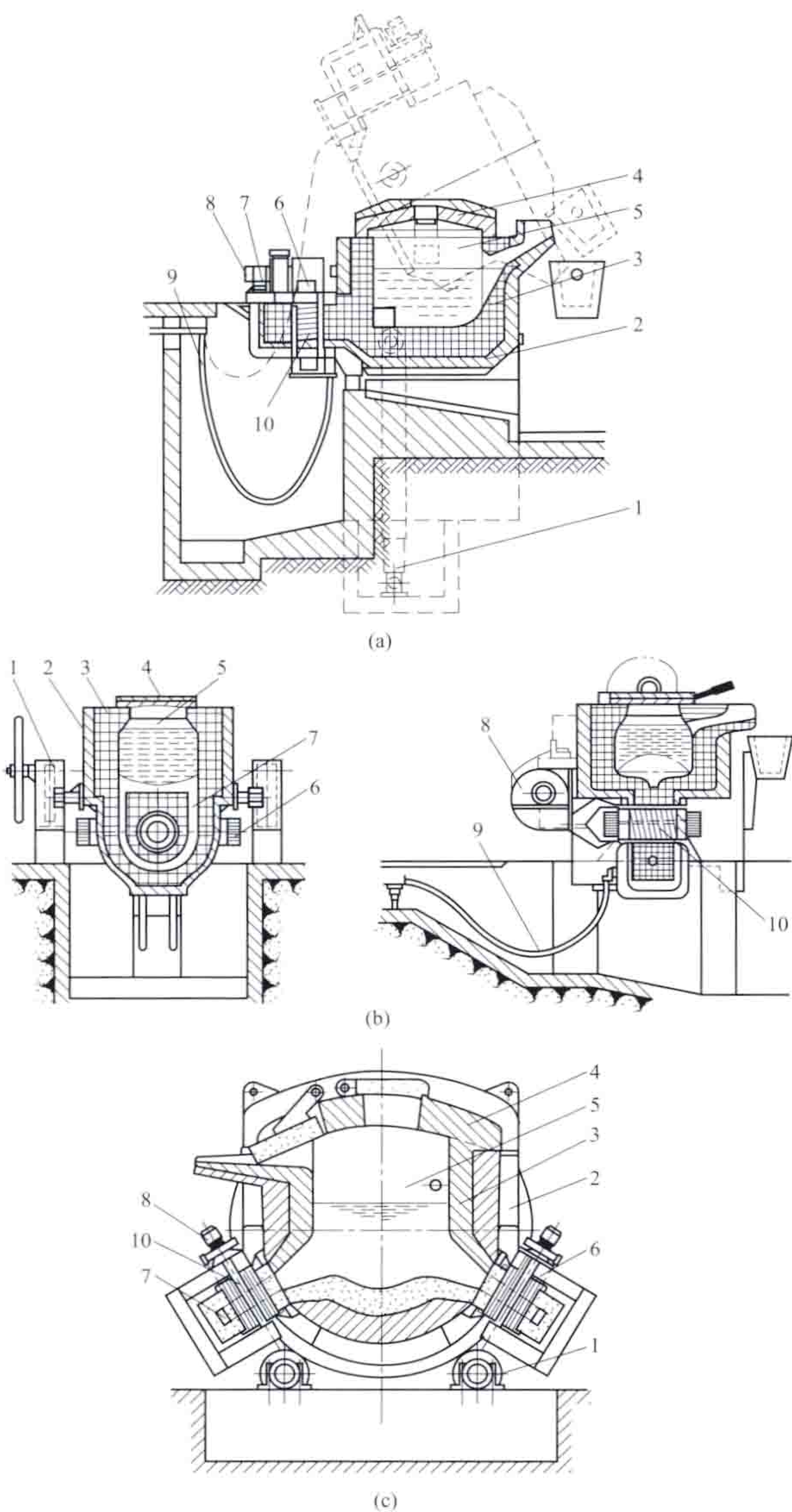


图 3 有心炉熔沟布置形式

(a) 立式布置；(b) 卧式布置；(c) 倾斜布置

1—倾炉机构；2—炉壳；3—炉衬；4—炉盖；5—炉膛；6—铁芯；7—熔沟；8—冷却风扇；9—电缆；10—感应线圈

与无心感应熔炼炉比，有心炉的优点是：①功率因数高；②效率高；③电源设备投资小。缺点是：①启用前熔沟内要先加入液态料，出料时炉内液态料不能倒完；②停炉时要继续通电保温以防熔沟内液态料凝固；③熔沟内温度高，耐火材料易蚀损；④生产率较低等。

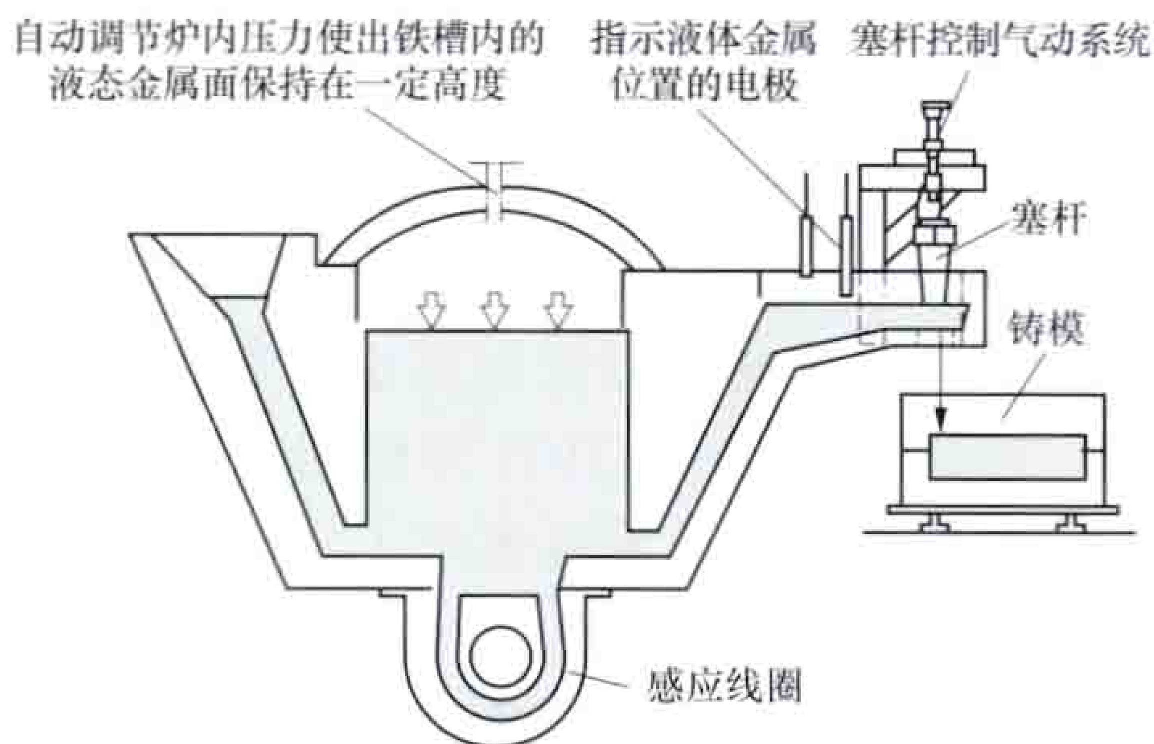


图 4 炉体固定式气压定量浇铸有心炉结构

有心炉主要用于铜、铝、锌等熔点较低的金属及其合金的熔炼和保温，以及用于铁水、钢水的保温，有时也用于铸铁的熔炼，在有色金属工业和铸造业中起重要作用，并已用到连续铸钢生产中。

无心感应熔炼炉 简称无心炉。图 5 所示为一种典型无心炉的结构示意，感应器围绕在坩埚之外，感应器外面有用硅钢片叠成的长条形导磁体（磁路不闭合），均匀地分布在感应器四周，用以约束感应器漏磁通的扩散，防止周围金属件过热，提高炉子的电效率和功率因数。导磁体与感应器、炉架构成一个结实的整体，以防炉架等因电磁力而松动。倾炉机构能使炉体做约 90°的回转，以便于出料。

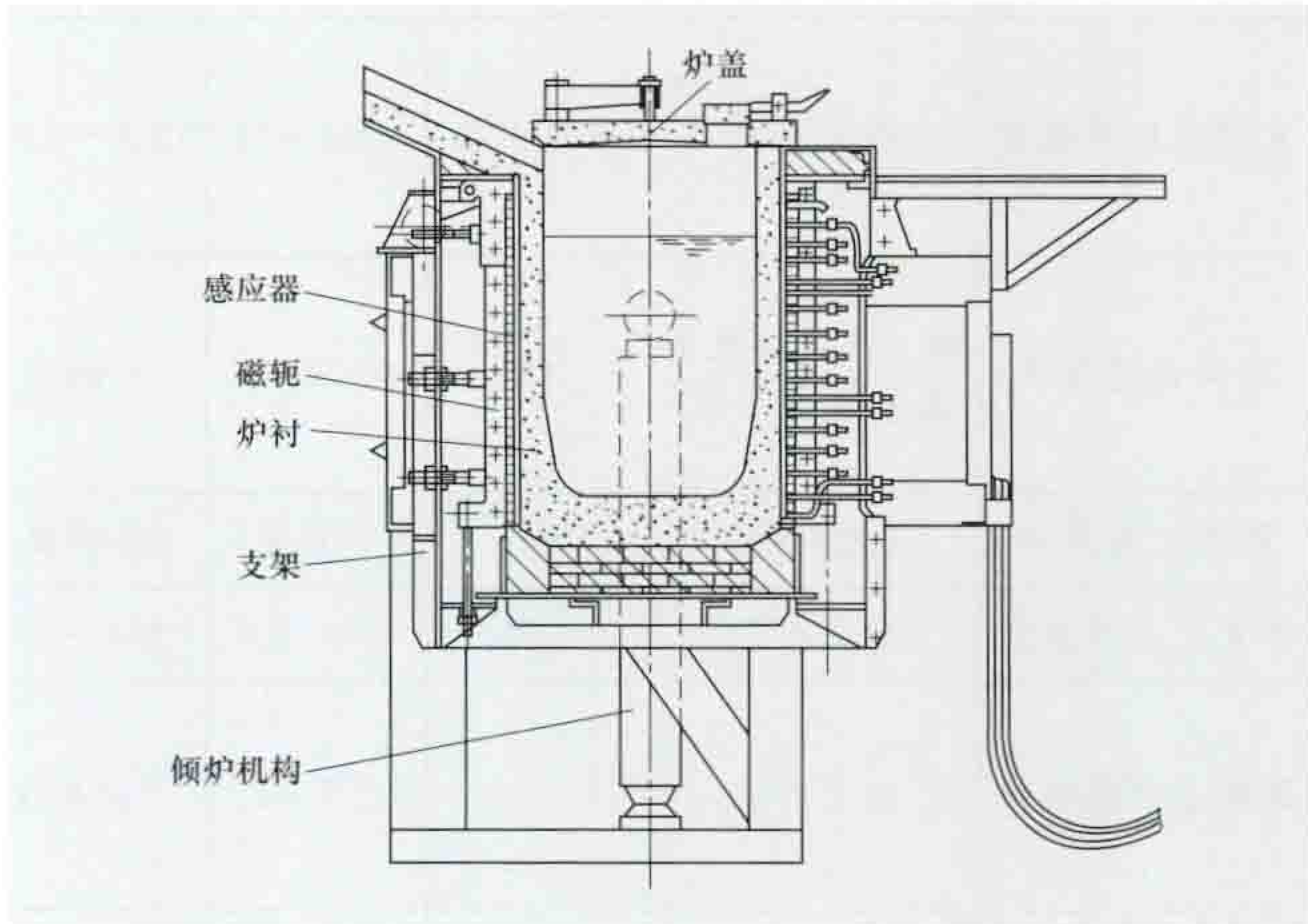


图 5 无心感应熔炼炉结构示意图

坩埚通常是用颗粒状耐火材料在炉内捣打烧结而成的，小型炉也有用预制成型的坩埚。耐火材料有酸性、碱性和中性，按熔炼要求选择。无心炉在熔炼结束后可以把液态炉料全部倒完，因此适宜于多品种小批量金属料的熔炼；炉子输入功率的配置比同容量有心炉大得多，因此生产率高。无心炉的种类很多，各类无心感应熔炼炉概况见下表。表中除卧式无心炉外都是立式的。

工频炉、中频炉、高频炉 视炉子容量和熔炼要求配用工频、中频或高频电源（见电炉变频电源），相应的无心感应熔炼炉称为工频炉、中频炉、高频炉。工业上主要用工频炉和中频炉。工频炉有电源设备简单，适宜于大容量等优点；缺点是最小容量不宜小于 750kg（否则效率太低），冷炉启熔时料块直径要在 200mm 以上，每炼完一炉后不宜把炉料全部倒完，设备投资中电容器费用所占比例大等。中频炉（见图 6）在上述方面比工频炉好，且有较高的单位输入功率，其生产率比同容量的工频炉高 50%以上。中频炉不但在中、小容量炉中有明显优势，而且正在大容量炉中逐步替代工频炉。

容量相同的工频炉常按其额定功率再细分为两个品种：配大功率者主要用于冷料熔炼，称熔炼炉；小功率者用于液态料保温，称保温炉。中频炉也是这样。

矮线圈炉 工频炉的一种特殊形式，感应器布置在坩埚的下部，其高度只是金属熔池高度的 0.2～0.25（普通工频炉约 0.7），且熔池高度与直径之比不超过 1（普通工频炉约 1.5）。它作为铁水保温炉，与有心炉比，有铁水温差小、成分均匀、除渣方便，适用于间歇作业等优点，但其功率因数和电效率都较低。

无心感应熔炼炉概况表

名　称	炉衬材料	电源类别	容量范围(t)	工作温度(℃)	主要用途
工频炉	耐火材料	工频	1.3～100	700～1600	铸铁、合金钢、有色金属合金的熔炼和保温
中频炉		中频	0.25～60		
高频炉		高频	～0.05		贵金属的熔炼
矮线圈炉	耐火材料	工频	5～120	600～1550	铸铁和有色金属合金保温
铁坩埚炉	铸铁或碳钢（背衬绝热材料）	工频	0.5～15	400～800	铝、锌、镁等低熔点有色金属及其合金的熔炼
真空感应熔炼炉	耐火材料	多为中频	0.01～54	1200～1700	高温合金、高强度钢、磁性材料、电工合金、铀等的熔炼和浇铸
凝壳式感应炉	铜（做成特殊形式的水冷坩埚）	中频	0.03～3	～2600	钛合金的熔炼和浇铸，也可用于其他活泼金属和难熔金属
悬浮式感应炉	（无炉衬）	高频	（小容量）	（按需要）	制取高纯金属和合金
卧式无心感应炉	耐火材料	工频	10～90	1400～1550	铸铁熔炼和保温
等离子体感应炉	耐火材料		0.5～2	～1850	超低碳不锈钢，精密合金和含铝、钛等易氧化元素的高温合金的冶炼
增压感应炉	耐火材料		0.5～10		专门用于生产高氮钢

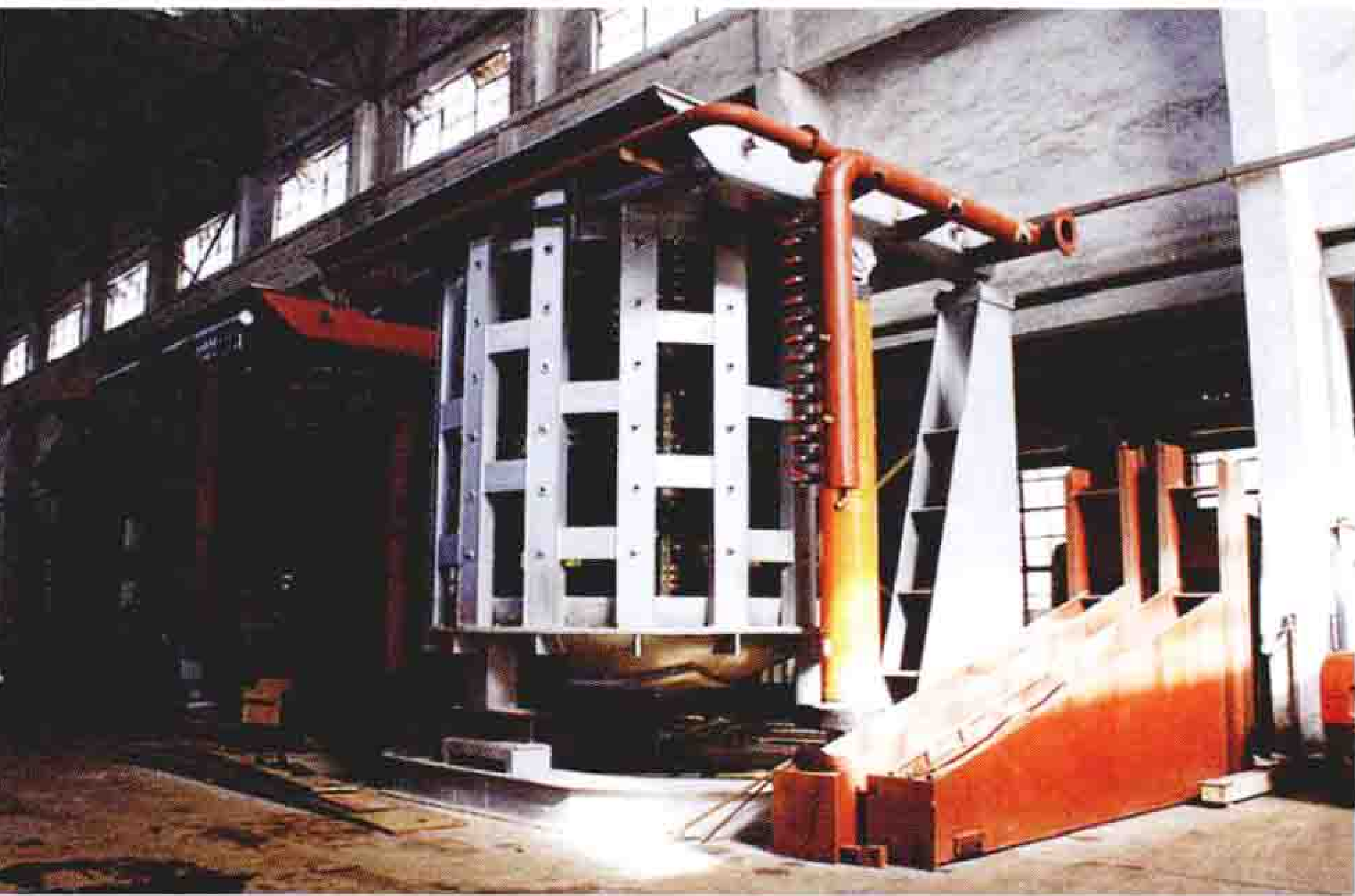


图 6　40t 中频无心感应熔炼炉

铁坩埚炉　工频炉的另一种特殊形式，坩埚用铸铁或钢制成，外面衬以绝热层。与耐火材料坩埚工频炉比，其电效率和功率因数都较高，但工作温度低，只用于低熔点金属的熔炼，且要采取措施防止熔炼中坩埚材料熔进被熔金属中。

真空感应熔炼炉　多数用耐火材料坩埚，坩埚位于真空炉壳内部。这种感应炉需配置真空机组抽气，工作真空度视熔炼需要而定，一般为 10^{4}～10^{-4} Pa，通常配中频电源。炉体除炉壳、感应器、供电装置、倾炉机构、水冷系统外，常附设有观察、测温、加料、取样、捣料等装置。这种电炉可分为间歇作业式和半连续作业式两种。前者每炼完一炉要打开一次炉盖；后者分几个炉室，一次熔炼浇铸完后，把锭模移到锭模室并关闭锭模室与熔炼室间的闸门，不破坏熔炼室真空就可进行第二炉熔炼。

凝壳式感应炉　一种特殊形式的真空感应熔炼炉。所用水冷铜坩埚区别于真空电弧炉和电渣重熔炉的双层筒形水冷铜坩埚，它既能通水冷却，又必须尽可能减小在坩埚壁中产生感应电流，以免进入坩埚内的磁场减弱。工作时，坩埚内表面会凝结上一层被熔金属的壳体。这种炉子用于活泼金属的熔化和浇铸。

悬浮式感应炉　高纯金属、高熔点活泼金属以及放射性物质等熔化用真空感应熔炼炉。这种感应炉采用高频电源供电。感应器由裸铜管绕制而成，周壁上带有绝缘切缝的水冷铜坩埚配置在感应器内。通电熔炼时，坩埚内的金属炉料由于受到电磁力的作用而呈悬浮状态，丝毫不与坩埚壁接触，因而不存在接触污染。

卧式无心感应炉　普通工频炉的变形，炉体呈卧式，有一个加料口和一个出料口，感应器水平布置，炉子不倾动。与普通立式工频炉比，其优点是结构紧凑、占地面积小、功率利用率高、电耗小、耐火材料蚀损少、温度变化可控制在±5℃以内、金属氧化损失小、除渣方便等。但这种炉子只适宜于单品种炉料的连续熔炼，还有轻料不易进入熔化区、屑料易浮在出料口引起搭桥等缺点。

等离子体感应炉　由普通感应熔炼炉外加等离子体枪组合而成。适用于冶炼超低碳不锈钢，精密合金和含铝、钛等易氧化元素的高温合金等。等离子体感应炉和普通感应熔炼炉相比，其特点为：①冶炼温度高，等离子体弧柱覆盖的液面温度或渣层温度可达 1850℃，可通过高温炉渣进行精炼；②可以控制炉内的气氛和压力以达到不同的精炼目的；③可以进行有渣或无渣冶炼。

增压感应炉　炉体形状与真空感应熔炼炉相似。增压感应炉是在 0.1～1.6MPa 高压氮气气氛下进行熔化、氮合金化和浇注等过程的，用于生产高氮钢。其主要特点为：①炉内氮气压力高；②炉内冷却水管路和坩埚内钢液表面承受压力。增压感应炉根据炉子容量大小，可分为间歇式和半连续式两种。

历史与发展　早在 19 世纪 80 年代就已发明感应熔炼炉，但早期是明沟式的，熔沟暴露在大气中，工作时，金属熔液因受径向电磁力的压缩会被截断，造成断电和金属飞溅，因此未获推广。1917 年根据美国人怀特（Wyatt）的建议，把熔沟设在金属液面之下以熔体静压力抵消电磁压缩力，制成了埋沟式有心炉。20 世纪 30 年代，有心炉在有色金属工业中得到推广应用，到 40 年代又开始用于铸铁保温。60 年代末问世的熔沟内金属定向流动技术，提高了有心炉的生产率，延长了熔沟的使用寿命。70 年代后随着连续铸

钢技术的发展，有心炉与超高功率电弧炉配合用作钢水的保温炉。20世纪末世界上最大的有心炉容量为1650t，装于南非，功率为15000kW，炉长15.2m，直径7.2m，安装有6只可拆卸式定向流动感应体，用于铸铁保温。

耐火材料坩埚无心感应熔炼炉中的高频炉早在1918年就已问世，用的是电火花高频电源。30年代出现了采用电子管高频电源的高频炉和以旋转变频机为电源的中频炉。坩埚式工频炉是在第二次世界大战以后才有的，从50年代起在铸造业中得到推广。1966年以后，晶闸管中频电源逐步取代旋转变频机及三倍频电源开始应用于感应炉，大大地推动了中频感应炉的发展。中小型铸钢厂30t以下的电弧炉基本上已全部由中频炉取代。70年代起晶体管中、高频电源相继开发，使中、高频感应炉的发展发生了大的飞跃。

真空感应熔炼炉问世于20世纪30年代，第二次世界大战后有较大发展，生产的高温合金、高强度钢，促进了现代航空航天技术的发展。中国自20世纪60年代发展真空冶金技术以来，真空感应熔炼炉冶炼技术得到迅速发展，已形成0.025～13t系列产品。

国外于20世纪60年代开始研制等离子体感应炉，到70年代建成容量为2t的生产用等离子体感应炉。中国已建成500kg等离子体感应炉。

增压感应炉是专门用于生产高氮钢的感应炉。国外已建成容量为200～500kg系列间歇式增压感应炉。容量为10t的半连续式增压感应炉于20世纪90年代在保加利亚建成投产。

ganying tongbuqi

感应同步器

(inductosyn; printed circuit multi-pole electrical resolver) 基于多极旋转变压器（见旋转变压器）工作原理的精确位移检测元件，是一种控制电机。它的固定部分和运动部分都有采用印制电路图形的平面绕组。感应同步器输出信号很微弱，需配以变换电路，将输出电信号进行处理，以提高精度。其精度很高，可达1μm或1″（1［角］秒）以下，又由于结构简单、工作可靠、性能稳定，广泛用于精密机床、大型机床、航天测试技术设备和装置等方面，构成角度或位移的精密测量、定位和随动系统。感应同步器有旋转式和直线式两种。

旋转式感应同步器　检测角位移的感应同步器。它主要由定片和动片组成，在定片和动片之间有均匀气隙。定片和动片都是在钢板制成的环形基板上采用印制电路的平面绕组，分别称为定子绕组和转子绕组。转子绕组串联相接，每一根导体代表一个极，构成多极形式。定子绕组为互差90°电角度的两相绕组。转子绕组以交流电压U励磁时，定子两相绕组A、B的输出电压为

$$\left.\begin{aligned} U_A &= KU\sin p\theta \\ U_B &= KU\cos p\theta \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中K为电压耦合系数；p为极对数，即转子绕组导体数；θ为动片转角。

直线式感应同步器　检测直线位移的感应同步器。它由定尺和滑尺组成，相当于旋转式感应同步器的定片和动片。当定尺上的两相绕组分别以交流电压U_A和U_B励磁时，滑尺上的绕组输出电压为

$$U = K\left(U_A \sin\frac{\pi}{\tau}x + U_B \cos\frac{\pi}{\tau}x\right) \quad (2)$$

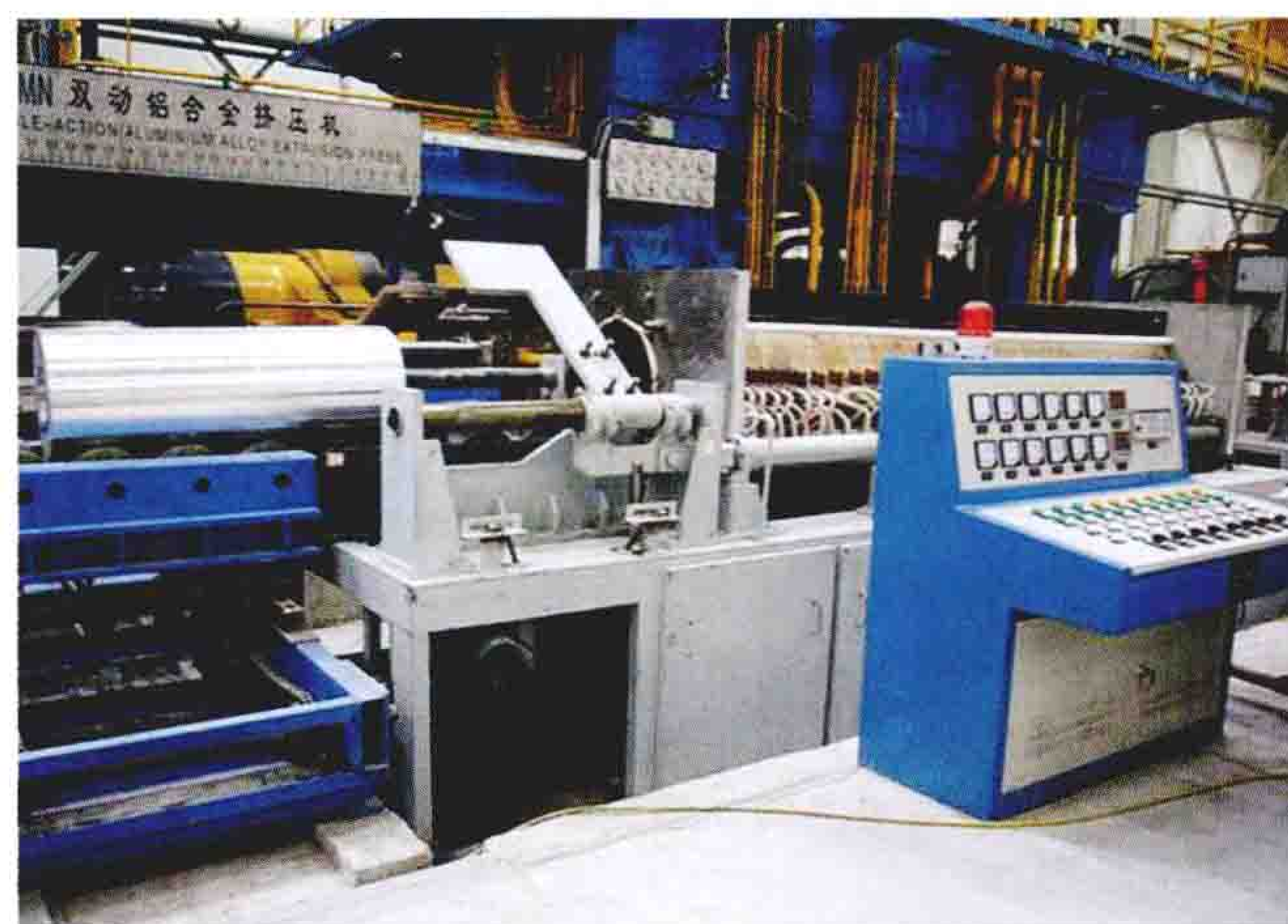
式中K为电压耦合系数；τ为极距，mm；x为滑尺直线位移量，mm。

ganying toure zhuangzhi

感应透热装置

(induction through-heating installation)

供金属材料透热用的感应加热装置，又称感应加热炉（见图）。进行感应加热时，由于金属材料中感应电流的趋肤效应，热量主要在表面层产生。电流频率愈高，加热层愈薄。如果电流频率和输入功率选择适当，并采取其他措施，使表面电流加热层足够厚，并让在表面层中实际得到的热量与由表面层向内部传导的热量相当，则可以做到表面层的温度不过高而热量能透入到炉料内部，使整块炉料得到大致均匀的加热，习惯上称透热。



感应加热炉

应用　感应透热装置主要用于钢锭、铝锭和铜锭在锻造、轧制、挤压等热加工前的加热，以及钢、铸铁等金属材料和某些机械零件的整体加热和退火、回火等热处理，在汽车、拖拉机、工程机械、轴承、工具等许多行业中得到广泛应用。感应透热装置还可用于核电行业，如锆锭的感应加热。

特点　与用燃料炉加热比，感应透热的优点是：①加热快、金属氧化损失少，可节省金属材料，延长模具寿命；②加热温度可较精确控制，且可对炉料沿长度方向分段进行不同温度的加热（对铝锭常有此必要）；③起动和停止快，便于使用，生产率高，加热效率高；④易用于机械化、自动化生产线中，适宜于批量生产；⑤对环境污染小。缺点是：①设备投资较高；②不适宜加热形状复杂的工件和多品种小批量生产。

构成　感应透热装置主要由电源、透热设备、控制系统等部分组成。

电源视炉料材质和尺寸可用工频、中频或高频电源（见电炉变频电源）。选择适当的电源频率对加热效率有重要作用。

透热设备由机架、感应器、炉料输送机构等部分组成，多附有冷却系统。透热设备结构形式很多，按作业方式有

间歇式（一次进料，一次出料，加热时炉料在感应器内固定不动）和连续式（加热时炉料在感应器内不间断地或有节奏地从进料端向出料端移动）两类。炉料输送方式有推送式、夹辊式和步进式等。驱动方式有人工、气压、液压和电动等4种。感应器内部有用耐火材料、绝热材料制成的炉衬，炉衬内通常设有耐热钢材制成的托架或导轨，用以支承炉料，导轨中通常通水冷却。金属材料透热时，由于感应电流的趋肤效应，材料的表面和中心会产生横向温差；由于感应器两端磁力线分散和热损失较大，炉料的端部和中间会产生纵向温差。透热设备设计的一个重要内容是使加热后炉料内部的温差在允许的范围内。

控制系统用来监测和控制加热过程中各项电参数、炉料温度以及炉料的输送动作和速度等。

历史与发展　感应透热装置的应用始于第二次世界大战期间，当时主要用于炮弹坯料锻造前的加热。战后这种装置在民用工业中迅速得到推广。20世纪70年代美国制成6套大型感应透热装置，总功率为210 000kW，单个感应器最大功率为20 000kW，用在薄钢带连铸连轧生产线中，可加热重28t的扁锭，总生产率达540t/h。该装置能把扁锭在1h内加热到1260℃，加热电耗为358kW·h/t，钢材表面氧化损失小于0.125%，加热成本比用燃料炉加热少50%以上。中国于1963年开始研制感应透热装置，第一台用于铝锭加热，总功率为800kW。20世纪末铝锭透热装置已系列化，钢锭透热装置也有较快发展。21世纪初，中国自主研制出第一套总功率达6000kW的大功率串联电源方坯（钢锭）在线感应透热装置。

随着人们环保意识的增强和电力供应的日益充足，感应透热装置将会在更多的加热领域替代燃料炉。

ganying yixiangqi

感应移相器　（induction phase shifter）　一次交流电压励磁，二次输出电压幅值恒定，一、二次相位差与转子转角成线性函数关系的控制电机。按励磁相数可分为单相感应移相器和由正交两相电压励磁的两相感应移相器。极对数大于1的为多极感应移相器，单对极和多对数感应移相器的组合为双通道感应移相器。感应移相器是正余弦旋转变压器（见旋转变压器）的一种特殊应用。与通常的正余弦旋转变压器相比，感应移相器的励磁电压低，频率范围广（0.05～500Hz），故自成系列。

感应移相器在同步随动系统和数字随动系统中用于转角传递。

ganying zhaoming kongzhi

感应照明控制　（audio lighting control）　利用传感器采集特定照明场所内的各种物理信号实现对该场所照明系统的开关、明暗度和色调的调节。通常分为光电照明控制、音频照明控制和微波照明控制等。（见照明控制）

光电照明控制　利用光信号实现对照明系统的开关、明暗度和色调的调节。其控制原理如图所示，利用不同的光敏元件的光电转换效应，把不同性质的光信号转换为电流，通过放大器、控制器来实现对光源的控制。常用的光敏元件有光电池、光敏电阻、光敏半导体管等；放大器一般采用晶体管线路或集成运算放大器构成；控制器可采用继电器、接触器或晶闸管等元器件。



光电照明控制原理

光电照明控制主要分为自然光控制、人为光控制和红外光控制。

自然光控制　通过光敏元件随环境照度变化而大幅度变化的特性，控制晶闸管的导通与截止，从而实现晚上或环境光线陡降时自动开灯，白天自动关灯的目的。多用于需要夜开昼关的照明控制场所，尤其适用于城市道路、广场、建筑工地、各类公共指示标志、户外广告、障碍标志等照明，在汽车灯系统上也有广泛应用。

在自然光控开关基础上，增加红外、声控、微波、定时等控制功能，可构成理想的延时开关。这里自然光的作用是为了保证白天或环境达到一定照度时，使光源处于关闭状态。只有在夜间或环境照度低于人为要求时，靠声波、超声波、微波或人体红外辐射等作用启动照明，当信号消失之后经过延时电路的控制，自动关闭照明。

自然光控开关与微电脑控制相结合，可实现复杂的时序照明控制（见定时照明控制）。自然光控开关与调光控制相结合，还可达到光控调光的目的。典型的应用如高级办公室、工作间、教室、灯光运动场以及航海、航空障碍照明等对光照度有恒定要求的场所。

人为光控制　靠人为发射的光信号来控制照明光源的点亮和熄灭，通常也称为光电遥控开关。这种遥控方式多用于高档家居、会议室、多功能厅等需要随时因功能的变化及时改变照明状态的场所，也可用于机关厂矿的门区照明、库房照明的控制。

红外光控制　利用人为制造的红外光或人体固有的红外辐射控制照明光源的点亮和熄灭。红外光是一种在可见光谱长波段以外，人眼看不见的光线，是介于可见光与无线电波波长之间的一种电磁波。自20世纪80年代以来，热释红外传感器件的诞生和发展，使红外控制在照明领域中得到了广泛应用。控制方式有遮挡式、感应式和遥控式。

遮挡式红外光控制的探测部分由红外发光二极管与光敏三极管构成，将其分别置于需要控制的通道或门口两侧。当有人经过时，发光二极管发射的红外光被遮挡，光敏三极管因失去光照而产生光电效应，通过线路作用触发双向晶闸管导通，点燃照明灯具。

感应式红外光控制是利用人体辐射的远红外线强度的变化来控制照明灯的点亮和熄灭。该控制系统由传感器和控制器两部分组成。其工作原理是借助于经过滤光、聚焦等特殊工艺处理的、仅对人体辐射红外线敏感的红外探测器检测人体辐射的红外线，经控制器放大、滤波、整形、运算分析后驱动主开关，达到自动控制照明设备的目的。为防止在光线充足时点亮电灯，在控制器中还加有以光敏三极管为主要元件的光控电路。使用这种开关，在其控制的照度区域内，可实现有人灯亮、无人灯灭的自动照明控制，适用于人群经常活动的场合。这是一种节电效果显著，方便、实用的自动照明控制系统。

遥控式红外光控制有单通道遥控和多通道遥控之分，均

由发射机和接收机两部分组成，是利用红外光的作用，远距离调节光源状态的一种控制方式，多用于人们开关不方便的场所或家庭卧室等。

音频照明控制 利用传声器接收特定声波、音乐或其他声响幅度的高低或频谱分布来控制一个或一组半导体开关器件，实现对照明系统开关、照度和色调的调节。通常将具有这种功能的开关称为声控开关，它主要用于舞台、舞厅、俱乐部、广告宣传、音频彩灯喷泉、音乐花灯，以制造某种艺术效果，烘托娱乐气氛；或用于家庭、楼道、库房的照明控制。

在扩音技术发展的基础上，音频照明控制的发展较早，但由于当时人们缺乏音乐欣赏与光线色彩结合在一起的意识，只是利用声音对照明电光源进行简单的开关控制。随着人们在艺术欣赏方面要求的不断提高，将音乐彩色喷泉与舞台灯光系统有机地结合在一起，创造出了声光一体的艺术效果，使得音频照明控制进入了一个崭新的阶段。

作为音频照明控制的扩展，人们成功地研制出超声波和次声波遥控开关，其控制原理与音频控制类同，可用于家庭、库房以及楼堂馆所的照明控制。

音频照明控制有开关型、延时型、调光型3种。根据控制方式不同，音频照明控制分有线控制和无线控制两种，又有群控和单控之分。

随着电子技术的发展，声控技术的集成化程度越来越高。声控集成电路一般由音频放大、延时整形、选频、触发、驱动五部分组成。当利用声源点亮电灯后，还可经过电子线路的可调延时后自动熄灭。

由于日常生活中声波干扰很多，造成被控光源误动作几率大，直接影响了这种照明控制方式的应用。为了解决音频控制的抗干扰问题，人们利用现代电子技术研制出了智能音频照明控制开关，这种开关分为可识别短句的智能控制开关和可识别音色特点的音频控制开关，可识别短句的智能音频控制开关可以听懂人的短语，如“开”“关”“亮”“暗”等，并按此口令控制光源的开启、关闭和调节亮暗。可识别音色特点的音频控制开关与可识别短句的音频控制开关相似，但需要将口令与事先存放的某个特定人的口令的音色进行比较判断，当这个口令的音色与存档的口令音色一致时，控制开关才实施操作，否则不执行口令。

微波照明控制 利用微波信号实现对照明系统的开关、明暗度和色调的调节。微波是指波长介于音波和光波之间、频率为300MHz～300GHz的电磁波。微波频率比一般的无线电波频率高，通常也称为超高频电磁波。微波的基本性质通常呈现为穿透、反射、吸收三个特性。对于玻璃、塑料和瓷器，微波几乎是穿越而不被吸收；而对金属类材料，则会反射微波。微波照明控制分被动式和遥控式两种。

被动式微波照明控制 由本机振荡电路产生一个固定的高频信号（一般为400～800MHz）经天线辐射到周围空间，当天线附近一定距离内有物体运动时，高频信号就会被运动物体反射回来再被天线接收，使原振荡电路的振荡频率和信号幅度产生变化，此变化信号经积分、放大、比较等处理后形成控制信号，使照明控制执行电路动作，达到自动控制该场所照明系统开关、明暗度和色调的调节等目的。

遥控式微波照明控制 利用微波传递的作用，远距离调节照明系统开关、明暗度和色调调节的一种控制方式。微波遥控器有单通道遥控和多通道遥控之分，均由发射机和接收机两部分组成。遥控式微波照明控制多用于人们开关不方便的场所或家庭卧室等。

gangbao jinglianlu

钢包精炼炉 （ladle refining furnace） 在钢包中对钢液进行精炼的炉外处理装置，简称钢包炉。利用钢包加盖或将钢包置于真空容器中使钢包内保持所需的工艺气氛，配备电弧加热设备或真空抽气设备、钢液搅拌设备和加料设备，对钢液进行精炼。钢包又叫钢水包、盛钢桶，原先只供盛装炼钢炉炼好的钢液以浇铸钢锭用，在钢包精炼炉中钢包既是接受初炼炉钢水的盛钢桶，又是加热的炉体和真空脱气时的受压容器，还是浇铸时的浇包，如图1和图2所示。



图1 精炼炉

20世纪70年代中期以来，世界钢铁工业已经形成“高炉—转炉—炉外精炼—连铸—连轧”和“电弧炉—炉外精炼—连铸—连轧”两种工艺流程共同发展的格局，作为上述两种工艺流程的中间环节——炉外精炼技术及其设备（如钢包精炼炉）已经确立了其不可替代的作用。炉外精炼是把炼钢炉（炼钢电弧炉、转炉等）的精炼任务，包括脱硫、脱氧、脱气、去除非金属夹杂物、调节钢的成分（微合金化）和控制钢水温度等功能，移到钢包炉中进行。

功能 钢包精炼炉的功能主要有：①加热。包括电弧加热、等离子体加热、化学热、氧燃加热等，其中以电弧加热最多。通过加热使钢水升温，保证合金化、精炼等操作，使钢水质量和温度满足连铸要求。②抽真空。采用抽真空设备，大多用多级蒸汽喷射泵系统，或采用机械泵系统对钢包中的钢水进行真空处理，去除钢水中的有害气体，如氢、氮等，进行真空碳脱氧和真空氧脱碳。③搅拌。搅拌能加快精炼反应，使钢水成分和温度均匀，去除部分有害气体。搅拌的主要方法有吹入气体搅拌和电磁搅拌，以采用吹入惰性气体（Ar）搅拌的方法居多。上述三个功能应根据冶炼的钢种和工艺要求选择，可以在同一套设备上使用，或者在一条精炼生产线上分别设立，但搅拌必须贯彻精炼的始终。生产超纯钢时，为了达到深脱硫的目的，应配备喷粉处理设备；



图 2　双工位精炼炉

为了达到成分精调、夹杂物形态控制的目的，应该配备喂丝机。生产高级优质钢材的现代化冶金企业，一般都是系统配套精炼设施，建成钢包精炼站。

分类　钢包精炼炉大致可分为两类：一类在精炼过程中用电弧或等离子弧对钢液进行加热，其中常用的主要有 LF 型（电弧加热钢包精炼法）。另一类在精炼过程中不用外界热源加热，其中常用的主要有 VD 型（真空脱氧法）、VOD 型（真空吹氧脱氧法）、LFV 型（电弧加热-真空脱气法）等。

LF 型钢包精炼炉　简称 LF 炉，其结构组成如图 3 所示，是应用最广泛的钢包精炼装置。LF 炉采用电弧加热，底部吹氩对钢液进行搅拌。电弧加热时的炉体是钢包，电弧加热设备与三相交流电弧炉相似。电极升降结构有三立柱型和单立柱型，后者是用一根立柱带动三根电极横臂一起升降。钢包坐落在钢包车上，在不同的工位间移动。LF 炉的主要工作是与电弧炉或转炉相配合，将原在初炼炉中进行的还原精炼操作移到钢包中进行，并对钢水的温度和成分进行精确控制。通常在钢包中采用埋弧加热，处理时添加高碱度合成渣，保持在强还原性气氛下进行精炼、脱硫、脱氧，成分调整简单易行，效果显著。LF 炉容量多在 20～300t 范围内，精炼周期 30～60min，100t LF 炉的变压器容量约 18～22MV·A，相应的升温速度约 4.5～5.0℃/min。

VD 型钢包精炼炉　简称 VD 炉，其结构组成如图 4 所示。VD 炉主要用于冶炼对气体含量要求高的钢种，起着真空脱氢、脱氮、脱氧，精确调整成分，改善钢水洁净度，夹杂控制，提高钢的质量等作用。VD 炉大多与 LF 炉配合使用。VD 炉的机械设备主要由真空罐、真空罐盖、真空罐盖车、测温取样设备、氩气搅拌系统、真空加料系统、真空管道系统、真空泵系统等组成。真空泵系统常采用多级蒸汽喷射泵，也有采用机械式（干式）真空泵的。

VD 炉主要技术参数为：工作真空度 67Pa，极限真空度 20Pa，从大气抽至工作真空度的抽气时间约为 5min。根据厂房条件，VD 炉真空罐的布置形式有地坑式、半高架式、高架式 3 种。

VOD 型钢包精炼炉　简称 VOD 炉。VOD 炉可以直接和电弧炉、转炉等配合，在初炼炉中调整好钢水中除碳和硅以外的其他成分，然后出钢将钢水倒入钢包，再将钢包放入真空罐内，同时从底部向钢包内吹氩气进行搅拌，并对真空罐抽真空，进行真空脱气，到一定真空度后从顶部降下水冷式氧枪向钢包内吹氧脱碳。VOD 炉提供了不锈钢冶炼必要的热力学和动力学条件——高温、真空、搅拌，是冶炼不锈钢，尤其是低碳或超低碳不锈钢的主要设备。VOD 炉的钢包给钢水留有足够的自由空间，一般为 1200～1400mm。VOD 炉处理的钢种都是低碳和超低碳钢种，因此钢水温度一般较高，包衬均选用优质耐火材料，钢包底部安装有活动水口。VOD 炉真空罐盖上安装有氧枪、测温取样设备、加料设备等。氧枪大多采用拉瓦尔式氧枪，主要由拉瓦尔喷嘴、输氧管、内外水套及枪体外套组成，可以有效地控制气体成分，增强氧气射流压力，强烈冲击钢水，加速脱碳反应。图 5 所示为 30t VHDVOD 炉。

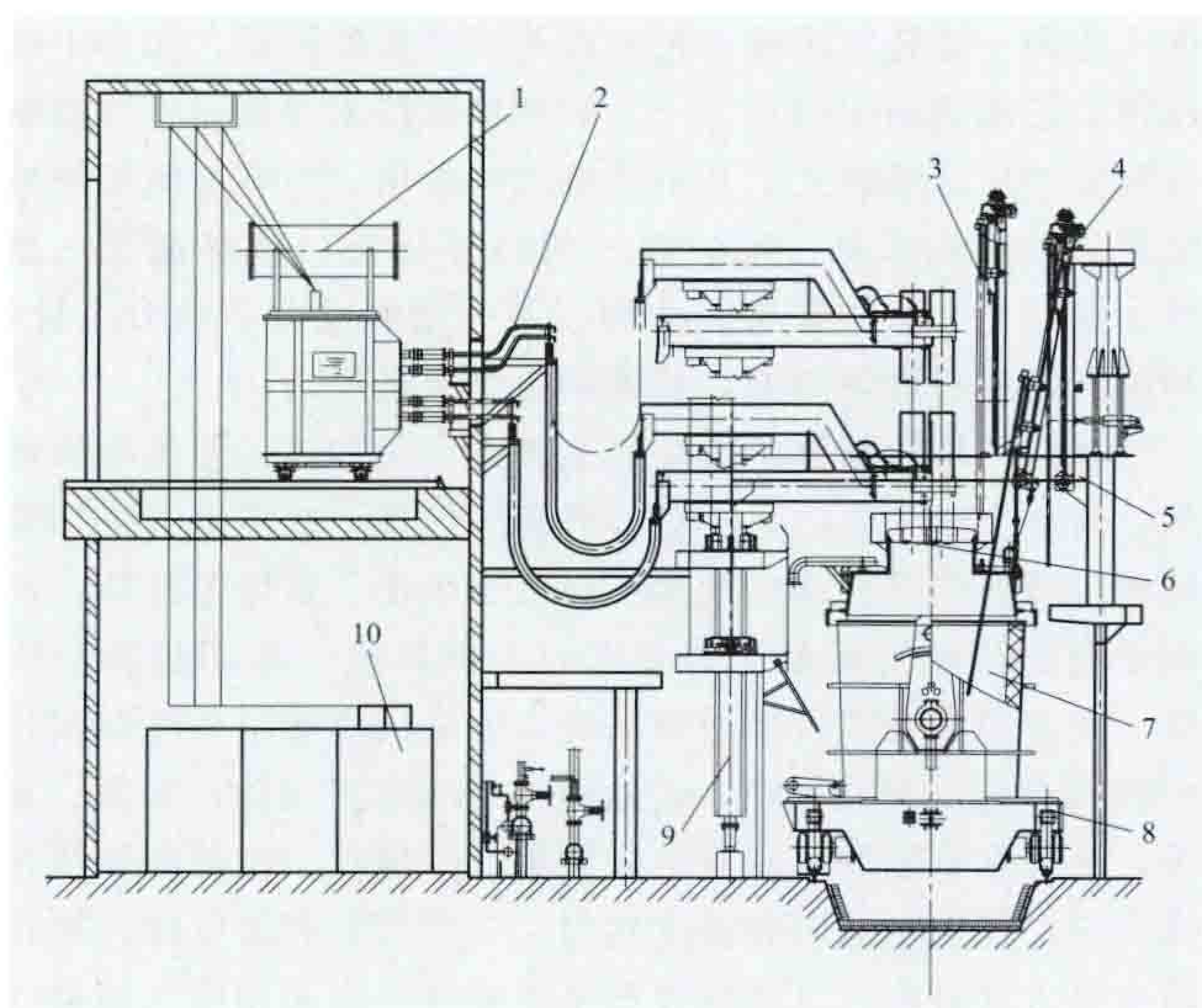


图 3　LF 型钢包精炼炉结构组成

1—变压器；2—大电流线路；3—事故氧枪装置；4—测温取样装置；5—桥架及包盖提升装置；6—水冷包盖；7—钢包；8—钢包车；9—电极升降装置；10—高压电气柜

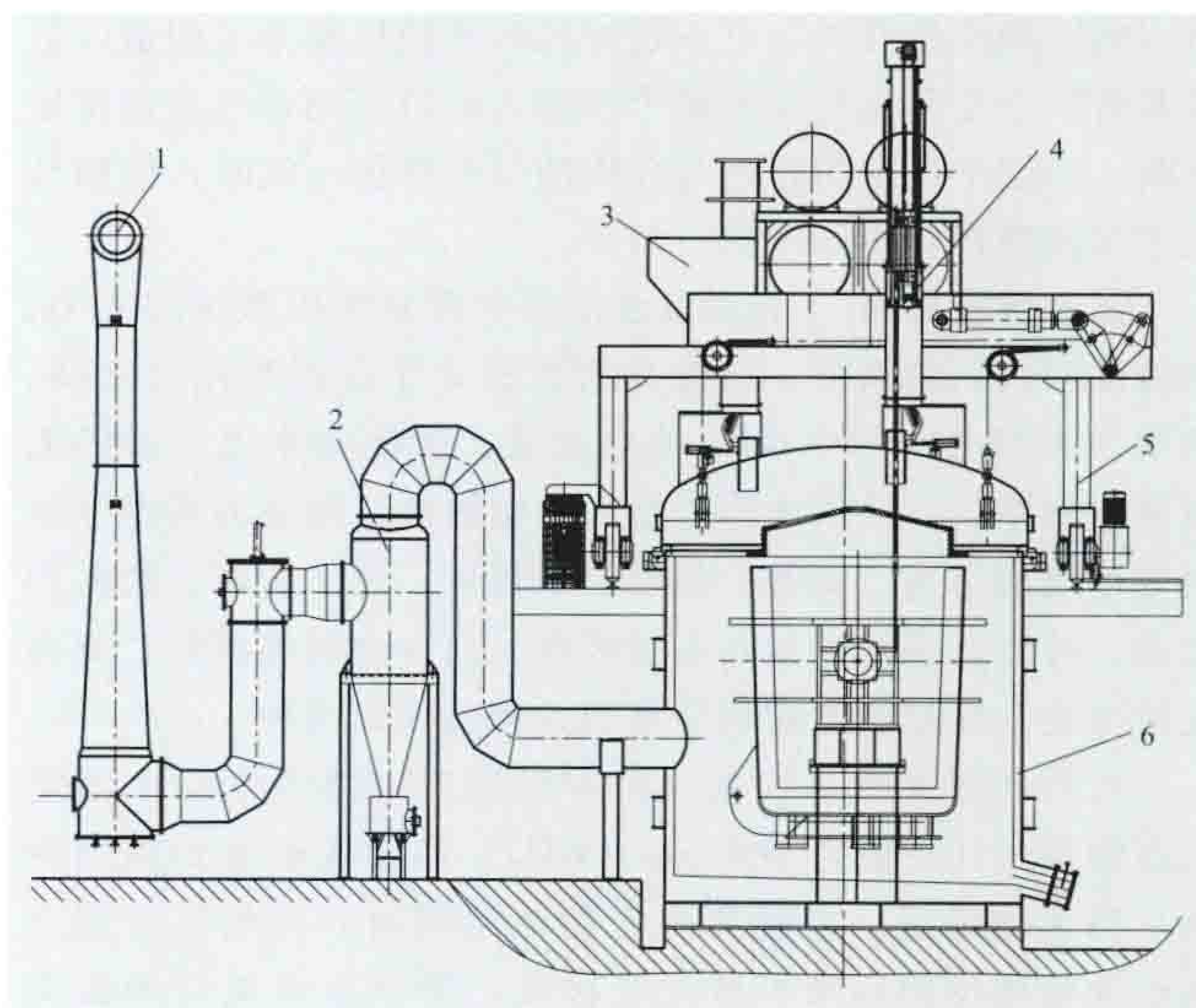


图 4　VD 型钢包精炼炉结构组成

1—真空系统；2—除尘器；3—加料装置；4—测温取样装置；5—真空罐盖车；6—真空罐



图 5　30t VHDVOD 炉

LFV 型钢包精炼炉　LF 炉与 VD（或 VOD）炉相结合并依靠真空罐车使这两种炉型连线布置的配套设备。比 LF 炉增加了真空罐，设置了加热工位和真空工位。真空罐座在真空罐车上，其载着钢水包在吊包工位、加热工位、真空工位之间交替工作。在加热工位设置了加热炉盖，在真空工位设置了真空罐盖。根据冶炼钢种和工艺要求，当精炼不锈钢、超低碳钢时在真空罐盖上设置氧枪系统；当不需要吹氧脱碳时，不设置氧枪系统。LFV 型钢包精炼炉集电弧加热、气体搅拌、真空脱气、真空吹氧脱碳于一体，功能齐全，工艺灵活，操作方便，冶炼的钢种多，质量好；但设备比较庞大和复杂，适于多品种优质钢的精炼。

历史与发展　20 世纪 30 年代，在高级钢种的生产中出现了多种炉外精炼法，对钢水进行脱气和精炼处理。1965 年德国首先开发了 VOD 型钢包精炼炉，用来冶炼不锈钢。60 年代末，瑞典 ASEA-SKF 公司开发了用电弧加热、采用电磁搅拌的钢包精炼炉，用来精炼轴承钢。1971 年，日本大同特殊钢公司开发 LF 型钢包精炼炉并得到推广，是应用得最多的钢包精炼炉。

20 世纪 70 年代末，中国研究开发了钢包精炼炉，国产的 LF、VD、VOD、LFV 型钢包精炼炉的整体性能和世界先进水平差距不大，在国内大中型钢铁企业及重机行业得到广泛应用，并大量出口到亚、非、拉地区。

钢包精炼炉的发展与连铸的发展密切相关，钢包精炼工艺及技术适应了连铸对优质钢水的要求，确保了铸坯的质量，并在钢水温度、纯净度和前后环节时间节奏的衔接上，对于电炉钢和转炉钢生产线的连续运行，充分发挥连铸机的生产能力来说都是不可缺少的调节手段。

钢包精炼炉的发展趋势是实现精炼技术的多功能化；利用信息技术，实现数据网络化，减少热停时间，注重产品质量的稳定性；优化布局，提高生产率；注重节能和减排，减少精炼过程中污染物的排放，加强环境保护。

gaogan zhaoming

高杆照明

（high-mast lighting）　灯具安装在高度不小于 20m 的灯杆上实现大面积照明的一种照明方式。主要用于城市道路和公路、立交桥、广场、体育场、机场、港口码头等大面积照明。

特点　①可根据需要灵活配置杆上的灯具数量和类型，不仅可为场地地面提供照明，还可为被照场所的空间提供照明；②与常规照明比，高杆照明灯杆少，避免了场地灯杆林立的现象，并可降低车辆或行人撞杆事故的发生率；③灯位高，照射面大，会有部分光线照到不需照明区域或附近的建筑物上，导致高杆照明光通量的利用率降低或对环境产生光污染；④投资费用较高。

分类　高杆照明分固定式（单柱或多柱）、升降式（电动升降或手动升降）、液压可倾式 3 种类型。固定式高杆照明设施由灯盘、灯杆及基础、配电系统和避雷装置等部分组成；升降式和液压可倾式高杆照明设施除上述组成部分外，还分别配置有用于升降和倾动的升降系统和可移动的液压装置。

灯具配置方式　有平面对称、径向对称和非对称 3 种。

（1）平面对称式。灯具对称地配置在垂直对称面两侧的一个或几个水平面上。这种配置方式的高杆灯多数设置在场地边缘，使光线射向灯杆前方场地。

（2）径向对称式。将灯具环绕灯杆呈径向对称布置。这一方式能均匀地照明灯杆周围的场地，灯杆应设置在被照场地内。

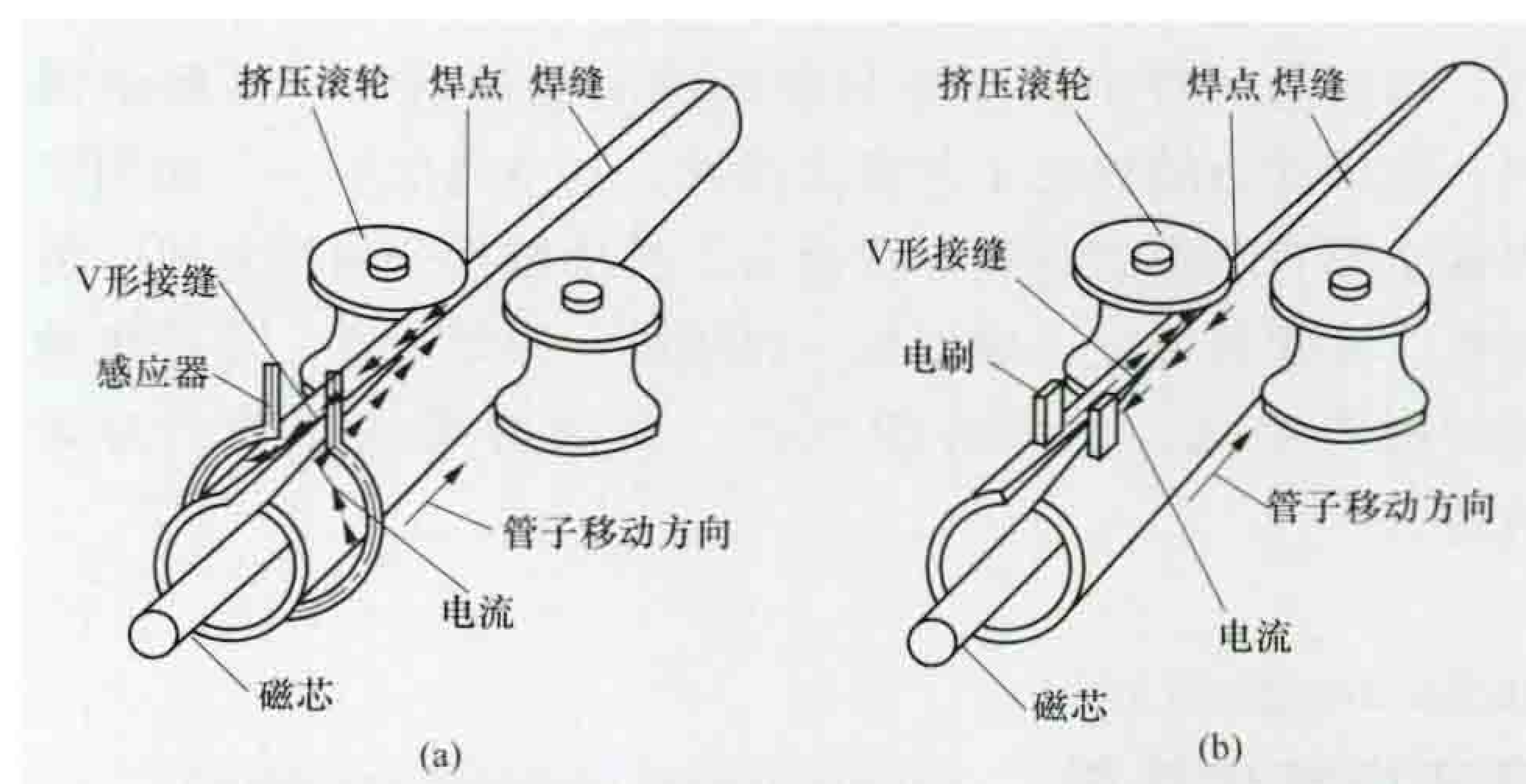
（3）非对称式。根据场地情况与照明要求有针对性地配置不同功率、不同配光与数量的灯具，以满足场地照明要求。在多层大型立体交叉或车道布局分散的立体交叉道路宜采用这一配置方式。

gaopinhan

高频焊

（high-frequency welding）　利用10～500kHz 高频电流产生的热作为热源的压焊方法（见焊接）。可用于焊接碳钢，合金钢和铝、铜、镍、钛、锆等有色金属及其合金，还可用来焊接异种金属。工业上主要用于生产金属有缝管和结构型材等；在汽车、自行车、电缆、食品罐头、锅炉等许多工业部门中得到应用，并正向核能、航空、航天等工业领域发展。

典型的高频焊如图所示，焊件（管坯）在两个滚轮间快速向一个方向移动，来自高频电源或通过电刷送入或由感应器感应产生的高频电流通过焊件 V 形接缝的两侧形成回路。焊点处的金属被焊件内阻和焊点处接触电阻所产生的电阻热加热到熔塑状态，在滚轮的压力下焊接在一起。管坯中心放置的磁芯（通常用铁淦氧磁棒）用来减少由环绕管坯圆圈方向流通的高频电流所产生的能量损失。由于高频电流的邻近效应，高频电流集中在 V 形接缝两侧，因此高频焊有极高的加热速度。



高频焊示意图

(a) 高频感应焊；(b) 高频电阻焊

高频焊的特点：①热量高度集中，热影响区小，焊件变形小，表面氧化少，焊缝外形平滑，焊接质量稳定；②用于连续焊，焊接速度快，焊接生产率高；③焊件表面在焊前一般不需清理（表面氧化皮类似电容，高频电流容易通过）；④焊接时不需填充金属和焊剂；⑤电能、材料和工时消耗少，焊接成本低。高频焊受焊件和接头形状的限制较严，高频电磁波会产生无线电干扰，须加屏蔽。

分类 高频焊分高频感应焊和高频电阻焊两类。

高频感应焊 焊件中的高频电流是由感应器感应产生的（见感应加热），如图（a）所示。优点是感应器不与焊件接触，设备运行平稳，焊件表面不会划伤或烧伤，没有电刷磨损等问题。缺点是焊件中的高频电流回路是闭合的，必须环绕焊件，这种方法实际只适用于焊接管材；另外，焊件中电流的路径长，电能利用率低（管径愈大，利用率愈低）。这种方法一般只用于小直径（9～114mm）金属直缝管，如水管、煤气管、电线套管、自行车管等的生产，特别适用于焊接有镀层的金属管。电源频率一般为400～500kHz。用100kW高频电源焊外径25mm、壁厚1.2mm的低碳钢管，焊件速度可达50～70m/min。

高频感应焊还可用于棒材或管材的对焊，利用感应器把两焊件的对接接头加热到熔塑状态，然后加压使之焊接在一起（见电阻焊）。

高频电阻焊 焊件中的高频电流通过电刷直接来自高频电源（见电阻加热），如图（b）所示。优点是：高频电流不在焊件内形成闭合回路，在焊件中的电流路径短，电能利用率高。缺点是需定期更换电刷，同时应注意解决因电刷跳动开路，使高频电源受损和因电刷下发生电弧使焊件表面烧伤等问题。这种焊接方法的适用范围宽，除广泛用于中、大直径且壁厚较大的金属直缝管的生产外，凡能构成V形回路，能利用高频电流的邻近效应，并能对焊部施加压力，生产连续性强、要求生产率高的场合都可采用。如用带材以螺旋形焊接厚壁（如10mm）大直径金属管，用板材或带材焊接断面呈I、H、L、T或Z形等的结构型材，在热交换器管上焊接螺旋形翅片等。除上述V形接缝的焊接外，利用高频电流的邻近效应，这种方法还用于汽车轮圈坯料的对头焊接（用约10kHz频率的电流）和圆形或椭圆形工件的卷边焊等。

焊接设备 高频焊接设备主要由电源和机械装置两部分组成。电源中用得最多的是输出频率为250～500kHz的电子管高频电源，由滤波器、配电柜、变压器、高压整流器、高频振荡器、输出变压器和操作台等组成。要求频率较低的场合，可用晶闸管中频电源和静电感应晶体管中、高频电源等。机械部分随焊接工艺要求而异，复杂程度不一。如用于焊接金属直缝管的高频焊接设备，其机械部分由拆卷机、剪边机、除铁屑装置、成型机、焊接机、冷却装置、定径机和锯切机等组成，如系连续生产，尚须有切头尾机、对焊机等。

gaosu dianqihua tielu

高速电气化铁路 (high speed electric railway)

地区与地区间或城市与城市间行车速度在200～350km/h的电气化铁路。国际上一般将铁路行车速度在100km/h及以下的称为常速铁路，在100～200km/h的称为快速或准高速铁路，在200～350km/h的称为高速铁路。高速电气化铁路具有旅行时间短、运输量大、单位能源消耗量小、环境污染小、运输成本低、安全、准时、受气候影响小等特点。图示为运行中的高速列车。



和谐号高速列车（严浩 摄）

分类 高速电气化铁路按采用的技术类型分为轮轨接触型和磁悬浮型两类。轮轨接触型又分摆式车体和非摆式车体两种。非摆式车体技术通常用于新建高速铁路或线路标准较高的既有线路，最高运营速度可达300km/h。摆式车体技术是通过列车经过曲线时车体的摆动来克服超高不足带来的乘坐舒适性较差的缺点，从而提高列车经过曲线时的速度限制，提高运营速度，减少建设投资，比较适合于既有线路提速。磁悬浮列车是一种技术更为复杂的交通工具（见磁浮铁路）。

关键技术 牵引供电系统和接触网悬挂系统成为保障电力机车高速运行的关键技术。

牵引供电系统 高速电气化铁路牵引供电系统较一般电气化铁路牵引供电系统的不同点在于：由于列车运行时轮轨间的摩擦阻力近似与行车速度的二次方成正比，而风阻则近似与行车速度的三次方成正比，因此，在高速条件下列车的单位能耗将大为增加，单台电动车组的功率亦将显著增大。同时，区段内运行的电气列车间距较大，供电臂内牵引负荷的不均匀性更为突出，加到一相上的牵引负荷很大，从而使电气化铁路牵引供电系统的负序、电压损失和主变压器过载等问题更加严重。为了缓解上述矛盾，可采取的措施有：

（1）电力牵引变电所采用220kV高压受电。一般公用电力系统允许的负序电流限值是以不对称负荷接入电力系统处的单相功率与电力系统在该处母线上短路容量的比值决定的。通常认为，当该比值在3%以内时，单相牵引负荷产生的负序电流不会对电力系统产生有害影响，采用较高的受电电压，可大幅度提高电力牵引变电所高压母线的短路容量，使高速电气化铁路的负序问题得到缓解。

（2）采用AT供电方式（见电力牵引AT供电方式）。这种供电方式的最大优点在于：可以在不提高接触网电压等级的条件下，将接触网的供电电压提高一倍。理论分析表明：AT供电方式接触网归算至27.5kV的单位阻抗仅为电力牵引直接供电方式时的25%左右，从而可显著增大接触网的供电能力并减小接触网内的牵引电流，有效降低网内的

电压损失和电能损失。

（3）在选择牵引变压器容量时，应充分考虑高速电气化铁路牵引负荷不均衡性的特点和牵引变压器在负荷显著不均衡时的合理过负荷能力，最好能根据高速电气化区段牵引负荷特点设计出一种具有较大短时过负荷能力的牵引变压器，避免因牵引变压器容量利用率过低造成电气化区段牵引供电指标低下。

（4）在牵引变压器二次侧可装设带负荷电压自动调整装置。为防止电压调整装置频繁切换，装置设有一定延时，当二次母线电压持续60s低于设定的母线电压下限时（一般为26kV），电压调整器将自动进级，并使母线电压保持在26kV以上。法国研制的牵引变压器二次电压带负荷自动调整装置共分20级，每级350V，可提供最大为7000V的补偿电压。

高速接触网悬挂系统　高速电气化铁路对接触网（见电气化铁路接触网）和电动车组受电弓的设计提出了很高的要求。在高速条件下，接触悬挂系统的振动加大，受电弓离线率增加，接触线拉弧和磨损严重。为了改善电动车组的受流条件，采取了加大悬挂系统的导线张力，提高支持点的悬挂弹性，预留接触线弧垂，减少接触线在桥隧建筑物下的落差坡度，使用轻型树脂纤维定位器，改善电动车组受电弓弹性等一系列措施。高速接触网悬挂系统已形成了以法国为代表的轻型高速接触网悬挂系统（简单链型悬挂）和以日本为代表的重型高速接触网悬挂系统（重型复链型悬挂）两大流派。其结构参数见表。运营实践表明：简单链型悬挂结构简单、工程造价低、施工调整方便，但弹性不均匀度相对较差；重型复链型悬挂弓网受流效果最好，可满足时速350km/h的运营要求，缺点是线索较多，结构复杂，施工难度大，运营维护不方便；弹性链型悬挂的特性介于上述二者之间，在中国的京沪高速、武广客专等众多运行速度在300km/h的客运专线中都有采用。

高速接触网悬挂系统结构参数

参　数	列车速度（km/h）	接触线截面积（mm^2）	承力索截面积（mm^2）
京沪高速铁路	300	镁铜150	镁铜绞线120
法国大西洋干线	300	铜150	青铜55
日本东北新干线	260	镉铜170	镀锌钢绞180
参　数	**辅助承力索截面积（mm^2）**	**悬挂系统总张力（kN）**	**接触网悬挂类型**
京沪高速铁路		53	弹性链型悬挂
法国大西洋干线		34	简单链型悬挂
日本东北新干线	硬铜150	53.9	重型复链型悬挂

沿革　20世纪50年代末，一些科技发达国家就开始研究和建设高速电气化铁路。世界上第一条真正意义上的高速电气化铁路是1964年10月1日正式通车的日本东海道新干线。该新干线起自东京，途经名古屋、京都等地终至（新）大阪，全长515.4km，运营速度高达210km/h，它的建成通车标志着世界高速铁路新纪元的到来。1981年，法国修建的第一条巴黎至里昂TGV（Train à Grande Vitesse，法语“高速铁路”的简称）线路开通运营，最高运营速度为270km/h。德国的高速铁路技术储备不亚于法国，德国的第一条高速铁路，是1991年6月建成通车的曼海姆至斯图加特ICE（inter city express，城际特快列车），时速达250km/h。

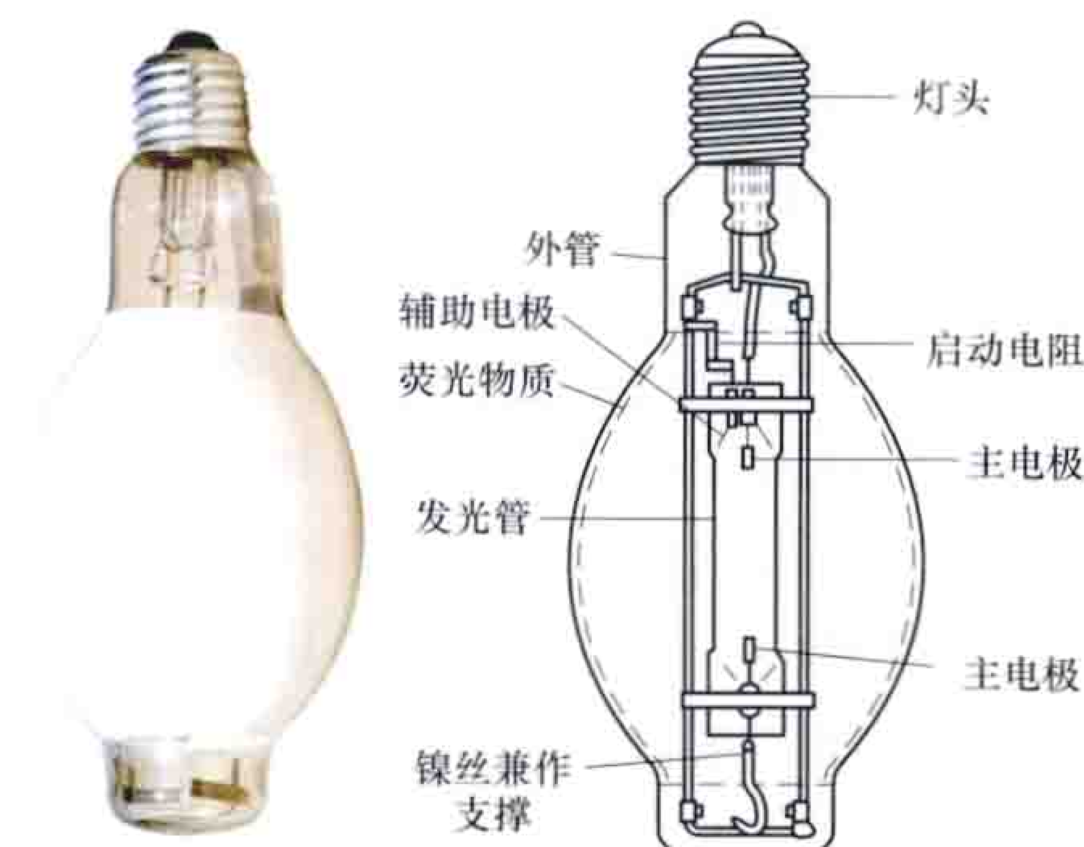
中国于1998年8月建成了第一条行车速度达200km/h的准高速电气化铁路——广（州）深（圳）铁路；2008年8月建成第一条最高时速达350km/h的客运专线——京津城际铁路；2011年7月建成了运营速度达300km/h的京沪高速电气化铁路。京沪高速电气化铁路从北京南站出发终止于上海虹桥站，总长度1318km，它的建成使北京和上海之间的往来时间缩短到5h以内。截至2011年底，中国高速铁路营业里程已达9795km，日本新干线2779km，法国TGV 2364km，德国ICE 1020km，西班牙AVE 1518km，意大利ETR 766km，韩国KTX 426km。

gaoya gongdeng

高压汞灯

（high pressure mercury lamp）　借助汞蒸气和少量氩气在电场作用下而发光的气体放电灯。灯的发光效率约为50lm/W，寿命在5000h以上。高压汞灯的色温较高，光色偏蓝，缺少红光。为改善光色，通常在高压汞灯外玻壳内表面涂敷荧光粉以补充红光。

结构　高压汞灯的结构如图所示。它的发光管须采用耐高温、高压的透明石英玻璃。灯内充汞量要保证在灯工作时能完全蒸发，并能达到灯管电压的技术要求。为了降低启动电压和保护电极，同时需充入气压为2.6×10^3Pa的氩气。在发光管的两端，采用钼箔封接电极。用钨作为主电极，并在其中充填碱土类氧化物等电子发射物质。为了加速启动，设置辅助电极。



高压汞灯

高压汞灯的外管，除了具有保持发光管的工作温度、防止金属零件氧化、隔断有害的紫外线和吸收特定波长的辐射等作用外，还能作为涂敷荧光粉和反射型高压汞灯的反射膜的基底。

原理　高压汞灯内的汞蒸气压力在常温时低于133.3Pa，当灯开始放电后，灯内温度上升，压力缓慢升高。在充入的汞全部蒸发后，汞蒸气压力可达$1.33\times10^5\sim1.33\times10^6$ Pa。随着汞蒸气压力的升高，汞电子和原子碰撞频率增大，气体温度接近并几乎等于电子温度。这时气体和电子间达到热平衡状态，在放电中心部位的温度高达6000K，并发出强光。灯中253.7nm的共振谱线被吸收，可见光谱线的强度上升，其中的主要可见光谱线有从7.37eV能级跃迁的404.7、435.8、546.1nm和从8.85eV能级跃迁的577.0、579.0nm。

高压汞灯的能量分配并不理想。400W高压汞灯的输入功率转化成可见光的辐射功率为59W，只占输入功率的

14%，转化为紫外辐射的功率为73W，占输入功率的18.2%。为提高高压汞灯的发光效率，须增大发光管的单位弧长功率和使用荧光粉将紫外辐射尽可能地转化成可见光。50～1000W照明用荧光高压汞灯的发光效率约为50lm/W。使用荧光粉的另一目的是改善光色，一般照明用荧光高压汞灯的平均显色指数 R_a 可由25提高到40～45。

高压汞灯具有延时再启动的技术特征。在高压汞灯熄灭后，必须要等到灯管冷却，汞蒸气压力下降后才能再启动。一般从熄灯到再启动要5min左右。若额外施加一个高压脉冲，在高温和汞蒸气压力高的情况下也能再启动，但会影响光源寿命。

用途　普通高压汞灯由于发光效率较低、色温高、显色性差，在普通照明场所已逐渐被其他高效光源所取代。特殊用途的高压汞灯有适合于300～500nm的重氮感光纸的静电复印机用高压汞灯；有供检查、广告、显示器用高压汞灯；有供保健医疗用高压汞灯；有用作尼龙原料等物质的光合成的高压汞灯以及作为紫外线涂料和墨水等聚合干燥用高压汞灯等。

gaoya nadeng

高压钠灯 (high pressure sodium lamp)

借助高压（10^4 Pa）钠蒸气放电发光的气体放电灯。它的特点是发光效率高达120lm/W以上，光色接近金白色。这种灯自1966年问世以来，发展十分迅速。由于制造工艺并不复杂，生产成本也相对较低，应用十分广泛，并取得了显著的照明节能和改善照明条件的效果。

结构与材料　钠是一种活泼金属，在常温下是银白色固体。低压钠蒸气放电时，钠的共振谱线具有很高的可见光辐射效率。随着钠蒸气压力的升高，由于共振谱线自吸收的增加，辐射效率下降。当钠蒸气压力继续上升时，共振谱线加宽，在长波部分出现辐射谱线而使辐射效率重新增高。试验表明，钠蒸气压力为 2.66×10^4～3.33×10^4 Pa时，灯的发光效率最高。

高压钠灯的结构如图1所示。发光管使用对高温、高压钠蒸气具有稳定化学性能的半透明多晶氧化铝陶瓷管，或者是部分透明的单晶氧化铝管（蓝宝石管）。为了减少由于自吸收所造成的辐射损失，发光管的管径不能过大。400W高压钠灯发光管的内径约为8mm或更小。在陶瓷管两端的氧化铝陶瓷端帽（或铌帽）用氧化钙、氧化铝混合物（CaO-Al_2O_3）掺入氧化镁（MgO）等作黏合剂封接，而支撑电极的铌管是在端帽部分封接。电极和陶瓷管的真空封接是保证高压钠灯质量的关键之一，其用料和加工均应从严处理。在发光管内，用作发光物质的钠和作为缓冲气体的汞，是以钠汞齐的形式过量充入。发光管内的氙气和氩气作为辅助启动用的气体，或是采用氖氩潘宁气体。为了防止端帽和铌管在高温下氧化而变脆，必须将发光管装入抽成高真空的硬质玻璃外管之中。为了保持外管的真空度，需在管中加入钡消气剂。外管抽成真空还可减少发光管的热损失，提高发光管的冷端温度，保证灯的钠蒸气压力和发光效率。

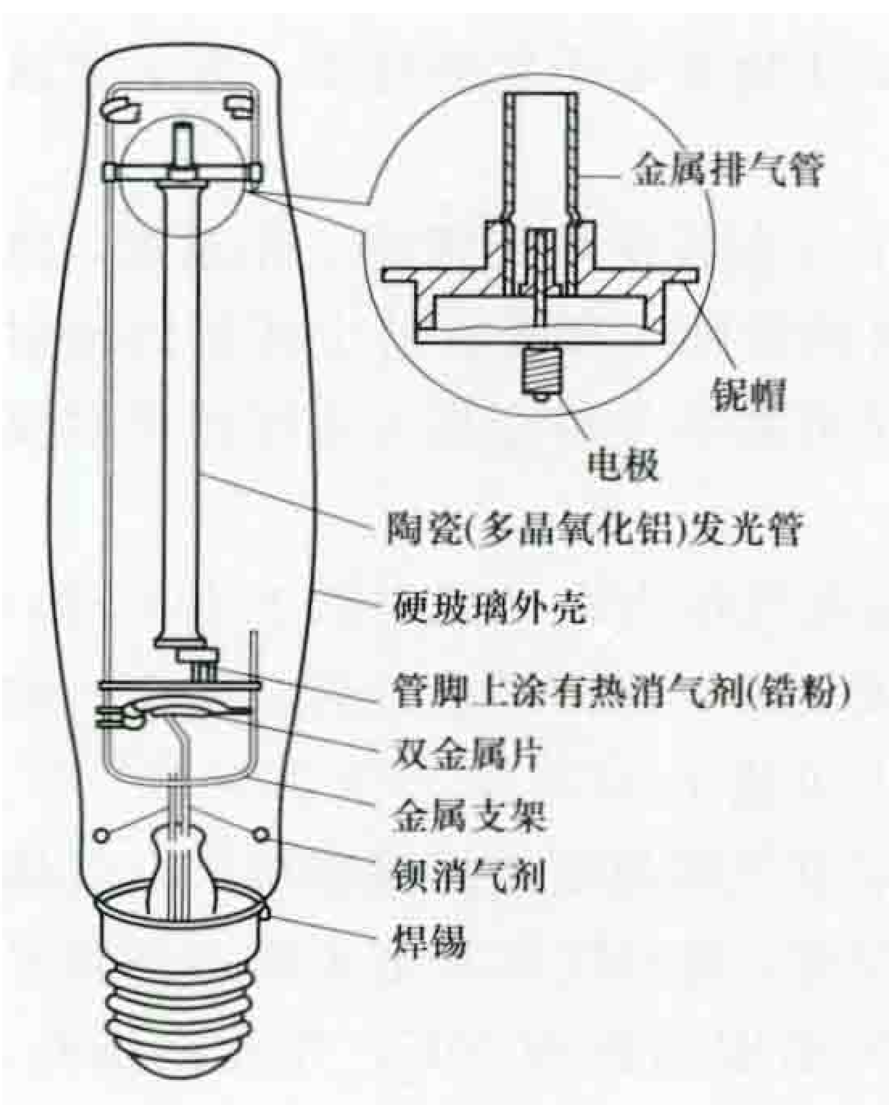


图1　高压钠灯的结构

特性　高压钠灯的色温为2100K；平均显色指数 R_a 为25。提高钠蒸气压力或加大发光管内径均可改善灯的颜色特性。但是随着灯的颜色特性的改善，发光效率则有所下降。试验表明，色温每提高100K，发光效率大约下降8lm/W。如果用蓝宝石作发光管，光效可比半透明陶瓷管提高20%～30%；若牺牲这部分增加的光效换取色温的提高，可做出色温2450K、光效为100lm/W的高压钠灯。另外，在灯中充入适量的其他金属，如镉或铊等，也可提高灯的色温，改善灯的显色特性。改进型高压钠灯的显色指数 R_a 可达65，高显色性型高压钠灯的显色指数 R_a 可达85。

寿命　高压钠灯问世初期，灯的寿命约为3000h。通过延长发光内管、调整冷点位置、控制管壁温度和压力等措施，高压钠灯的寿命已达到20 000h以上，成为寿命最长的电光源之一。

分类与用途　高压钠灯可按灯的显色性、功率和外壳特性进行分类。按灯的显色性分类，有普通型、改进型和高显色性型三类。下表给出了这三类250W高压钠灯的主要技术特性。根据这三类灯的不同特性，普通型高压钠灯主要用于室外对光色没有要求的场所；改进型高压钠灯主要用于对光色要求不太高的室内或室外照明场所；高显色性型高压钠灯则用于对显色性要求高的照明场所。不同外形的高压钠灯见图2。



图2　高压钠灯外形

250W高压钠灯的主要技术特性

灯参数	普通型	改进型	高显色性型
灯功率（W）	250	250	250
灯电压（V）	100	100	100
灯电流（A）	3.1	3.1	3.1
光通量（lm）	27 500	25 000	13 500
色　温（K）	2000	2100	2500
显色指数 R_a	20	65	85

geren diannao

个人电脑 (personal computer, PC)

适合于个人使用，并由最终用户直接操控的计算机的统称，又称个人计

算机。它既可以用于工作、学习和个人事务处理，也可以用来娱乐。1974年，英特尔公司生产出8080型微型集成电路芯片，E. 罗伯茨（E. Roberts）随之发布了装有8080处理器的计算机，掀开了个人电脑的序幕。80年代个人电脑开始逐渐进入学校和家庭，随着计算机技术的迅猛发展，个人电脑得到迅速普及。

分类 个人电脑是使用微处理器作为CPU的计算机，使用方便、占用空间小，有台式机、一体机、笔记本电脑、掌上电脑、平板电脑等。

台式机　各部件间相对独立、依赖数据线或电源线整合成一体的个人电脑，又称桌面计算机、台式电脑。台式机（见图1）主要由主机、显示器、键盘、鼠标等部件组成。台式机一般需要放置在电脑桌或者专门的工作台上使用。台式机的散热性、扩展性、保护性以及使用的舒适性等方面都相对优于笔记本电脑。

一体机　一种把微处理器、主板、硬盘、喇叭、视频镜头及显示屏集成为一体的个人电脑。有的一体机还具有电视接收、AV（音视频）功能。一体机（见图2）将芯片、主板与显示器集成在一起，显示器就是一台电脑，只要将键盘和鼠标连接到显示器上就能使用，其最大的优点是解决了台式机线缆多而杂的问题。

笔记本电脑　一种小型、可携带的个人电脑，又称手提电脑或膝上型电脑。笔记本电脑（见图3）与台式机架构类似，但是提供了台式机无法比拟的便携性，体积较小、质量较轻等。笔记本电脑大致可分为：①商务型笔记本电脑，特点可概括为移动性强、电池续航时间长、商务软件多。②时尚型笔记本电脑，外观优美，注重时尚，个性化气息浓重。③多媒体应用笔记本电脑，有较强的图形、图像处理能力和多媒体的能力，尤其是播放能力，为享受型产品。④上网型笔记本电脑，也称上网本，比较强调便携性，是轻便和低配置的笔记本电脑，具备上网、收发邮件以及即时信息、播放媒体和音乐等功能。⑤学习型笔记本电脑，机身设计为笔记本外形，采用标准电脑操作，全面整合学习机、电子辞典、复读机、学生电脑等多种机器功能。⑥特殊用途型笔记本电脑，服务于专业人士，可以在严寒酷暑等恶劣环境下使用的笔记本电脑，比较笨重。

掌上电脑　一种运行在嵌入式操作系统和内嵌式应用软件之上的、小巧、轻便、易带、实用、价廉的手持式计算设备。掌上电脑（见图4）无论在体积、功能和硬件配备方面都比笔记本电脑简单轻便，但在功能、容量、扩展性、处理速度、操作系统和显示性能方面又远远优于电子记事簿。在掌上电脑基础上加上手机功能，就成了智能手机。

平板电脑　无须翻盖，没有键盘，大小不等，形状各异，功能完整的电脑。平板电脑（见图5）的构成组件与笔记本电脑基本相同，拥有笔记本电脑的所有功能，但它是利用触笔在屏幕上书写，而不是使用键盘和鼠标输入，支持手写输入或语音输入，移动性和便携性比笔记本电脑更胜一筹。

选购和使用 随着计算机技术的发展，个人电脑持续向微型化、智能化、多媒体化趋势发展，并越来越得到人们的青睐。在选购和使用时应注意：①考虑适用性、先进性、兼容性、可扩充性和经济性，选定个人电脑类型、档次和适当的配置。②需防静电、防灰尘、防磁、防振，满足使用环境的温度和湿度要求；③正确开关电脑和插拔外围设备，不在它工作时对其进行搬动；④定期对数据进行备份并整理磁盘，预防计算机病毒；⑤发现问题要及时报修，使其始终工作于较好状态。


图1　台式机


图2　一体机


图3　笔记本电脑


图4　掌上电脑


图5　平板电脑

geren huli qiju

个人护理器具

（personal care appliances）　将电能转换为机械能或热能以帮助人们打理个人形象、处理个人卫生的一类小型家用电器的统称。主要包括电动剃须刀、电动脱毛器、电吹风、美容美发器、电动牙刷等。

电动剃须刀　电动机带动高速旋的刀片或电磁铁带动高速往复运动刀片，通过格栅紧贴于皮肤表面，剃剪胡须，见图1。按刀刃运动方式分，电动剃须刀可分为旋转式和往复式两种。旋转式结构简单，噪声较小，剃须力适中；往复式结构较复杂，噪声大，但剃须力强。按动力驱动方式，可分为电动机式和电磁振动式两种，电动机式多做成旋转式剃须刀，电磁振动式做成往复式剃须刀。按外形结构可大致分为直筒式、卧式、弯头式、双头式和三头式等。


图1　电动剃须刀

电动脱毛器　利用电力带动刀片或其他脱毛部件，剃除或拔除体毛的个人护理器具。按照脱毛方式的不同可分为电动剃毛器和电动脱毛器。电动剃毛器的结构和原理与电动剃须刀类似。电动脱毛器是利用电动机带动的旋转夹轮将毛发连根拔除。

电吹风　利用电动机带动的小型风机产生的高速气流，将电加热元件发出的热量吹出，形成热风，用于头发吹干和整形的个人护理器具，又称吹风机或干发器，见图2。电吹风按电动机形式，可分为单相交流感应式，交直流两用串励式和


图2　电吹风

直流永磁式 3 种；按送风方式，可分为轴流式和离心式两种。

美容美发器 一系列产生美容美发效果的个人护理器具的总称，见图 3。用于美容的有蒸汽面部美容器，用于美发的包括卷发器、直发器、理发器（电推剪）以及鼻毛修剪器和睫毛卷翘器。①蒸汽面部美容器，使用电能加热水产生蒸汽作用于面部皮肤，补充面部皮肤水分，打开毛孔以便进行其他清洁、卸妆程序。②卷发器/直发器，通过电能加热配合器具的卷曲和拉直头发的物理作用，改变头发外观以达到美发功能。③理发器（电推剪），利用电力驱动剪发刀组剪断头发以达到美发功能。④鼻毛修剪器，利用电力驱动拱形刀头深入鼻孔修剪鼻毛。⑤睫毛卷翘器，利用电力驱动睫毛整理梳，并通过电能加热睫毛，使睫毛卷翘定型。


图 3 激光定位理容器

电动牙刷 利用电力驱动刷头高速运动清洁牙齿的个人护理器具，见图 4。按照刷头运动方式可分为振动式和旋转式，旋转式较为普遍，也有两种运动方式兼有的电动牙刷。使用者可以采用手动电动结合的方式刷牙，以达到横向、纵向、旋转全方位刷牙的效果，提高刷牙除垢效率。少数高档电动牙刷还装有超声波仪器，靠脉冲、喷水来清洁牙齿。


图 4 电动牙刷

gongye jiqiren qudong diankong xitong

工业机器人驱动电控系统 (electric drive control system for industrial robot)

实现对工业机器人机械关节电动机驱动的控制电路和控制算法的集合。工业机器人驱动电控系统使机器人可以接受控制系统的指令，按预定的速度和轨迹运动到预定的位置上，或完成一系列复杂的操作。工业机器人驱动系统见图 1。


图 1 工业机器人驱动系统

组成 工业机器人一般由多个运动关节构成，如图 2 所示，需要多台伺服电动机和伺服系统，一个伺服电动机控制工业机器人的一个关节或者一个运动轴，上层控制器实现整个工业机器人的运动控制和动作协调，并把转速或者转矩指令发送给下层的伺服驱动器，伺服驱动器驱动电动机完成上层控制器的指令。工业机器人中使用的电动机主要有步进电动机、直线电动机、直流伺服电动机、交流伺服电动机、大力矩低速电动机等。

性能要求 工业机器人驱动电控系统应具备节能、省资源、综合效率高、运转成本低、噪声低、清洁卫生、控制稳定、运行可靠等特点。其硬件结构与普通伺服系统结构类似，但是由于机器人工作环境复杂、控制精度要求高，因此对其提出了一些特殊的要求：①机械时间常数要小，转矩惯量比要大，以满足快速反应的要求。②调速范围宽，力矩波动小，低速运转平稳，电动机在零速附近要可控并有足够的转矩输出，以满足各种运动速度及精度定位的要求。③功率体积比和功率质量比要大，机器人关节等运动部件上的空间有限，对电动机的体积和质量有严格要求。④过载能力要大，要有足够的热容量或者较好的散热性能，在自然冷却及全封闭条件下能长期工作。⑤可靠性要高，以满足长期在恶劣环境下工作的要求。

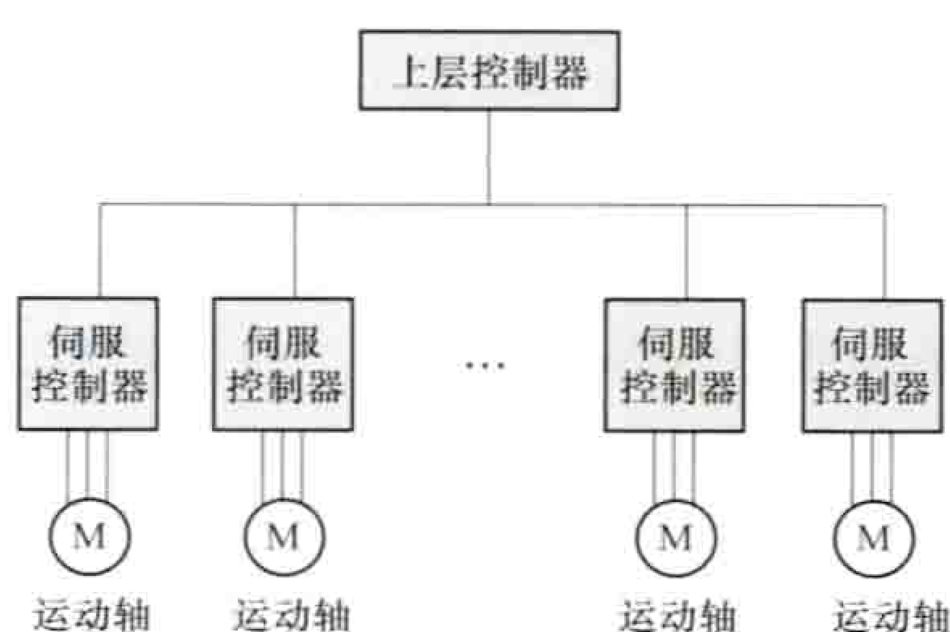


图 2 工业机器人多运动轴控制

控制方式 工业机器人的控制方式主要有位置控制方式、速度控制方式和转矩控制方式等，也可以对位置、速度和转矩中的两个或者三个量都进行一定的控制。例如在位置控制中，既可以只要求最终位置控制的精度和快速性，而对中间过程不做要求，也可以对位置控制过程中的速度、电动机的转矩进行一定的限定，以满足特殊工作环境的要求。例如弧焊、喷漆、切割等场合，既需要对位置进行控制，也需要对工业机器人手臂移动的速度和速度的平稳度有一定的要求。（见位置控制、转速控制、转矩控制）

gongzuo jiedi

工作接地 (operational earthing)

在低压配电系统中，为了保证电气设备的正常运行而采取的一种用电安全措施，又称系统接地。（见低压配电网接地方式）

接地通过金属导线与接地装置连接来实现。工作接地主要指变压器中性点或中性线（N 线）接地，可以将中性点直接接地，也可以通过消弧间隙接地。N 线必须用铜芯绝缘线，不能与其他接地系统，如直流接地、屏蔽接地、防静电接地等混接，也不能与 PE 线（保护线）连接。工作接地的接地电阻不应超过 10Ω。

工作接地的作用：①保持系统电位的稳定性，降低电气设备相对地间的绝缘要求。②当配电网一相故障接地时，抑制电压升高。③当工作接地由配电变压器二次绕组星形接线的中性点直接引出时，有固定中性点对地电位的作用，还能解决单相用电设备的电源问题。④当变压器一、二次绕组间发生匝间短路时，可以由监测装置给出信号或用保护装置进行保护等。

gonglü yinshu tiaozheng dianfei

功率因数调整电费 (power factor adjustment electricity charges)

用户实际功率因数与标准值比较产生减收或增收的电费。功率因数调整电费是促使用户合理进行无功就地补偿，稳定供电质量，降低输变电损耗，减少电力

系统无功电源投入的措施，也是世界各国电力公司的通用做法。用户用电功率因数低，将从电力系统吸收无功功率，增加系统有功损耗，也使用户端的供电质量下降，相应增加了系统无功电源的投入。按一般规律，在电力系统用电高峰时段用户功率因数低，而在电力系统用电低谷时段常有用户向电力系统倒送无功功率，使用户端的供电电压升高，同样也影响供电质量。因此，一些国家也有按高峰、低谷时段分别对用户功率因数进行考核。

在中国，功率因数调整电费的方法是按月平均功率因数进行考核，不同用户执行相应的功率因数标准。在基本电费和电度电费之和的基础上，乘以由用户实际功率因数对应的规定调整系数，计算出增或减应收电费的数额。低于规定功率因数标准的，调整系数大于1，反之则小于1。

用户实际功率因数通常取在电费结算期内功率因数的加权平均值，计算公式为

$$\text{加权平均功率因数}=\frac{1}{\sqrt{1+\left(\dfrac{\text{无功电量}}{\text{有功电量}}\right)^2}}$$

gongdiandian

供电点 (power supply point; supply terminals)

用户受电装置接入供电网中的位置。对专线供电的用户，接引专线的电力系统变电站或发电厂即为该用户的供电点；对高压供电的用户，接引的高压线路即为该用户的供电点；对低压供电的用户，接引的配电变压器即为该用户的供电点。当用户要求迁移受电装置或改变供电方式时，有可能引起其供电点的变更。供电点变更后，为适应用户这种变更的需要，将重新调整电力系统的供电能力或投资建设新的供电设施。

gongdian dianya dengji

供电电压等级 (supply voltage level)

供电企业向其用户提供的额定电压级别系列。在中国，通常将额定1kV以上供电电压称为高压，额定电压在1kV以下供电电压称为低压。高压标准电压等级系列为220，110，66，35，10（20）kV；低压标准电压等级系列为380、220V。

供电企业向用户提供的电压等级应根据当地电网条件、用户分级、用电最大需量或受电设备总容量，经过技术经济比较后确定。除有特殊需要，供电电压等级与用电设备容量或受电变压器总容量的匹配关系见表。

供电电压等级与用电设备容量或受电变压器总容量的匹配关系

供电电压等级（kV）	用电设备容量	受电变压器总容量
0.22	10kW及以下单相设备	
0.4（即380V）	≤100kW	≤50kV·A
10（20）		50kV·A～10MV·A
35		5～40MV·A
66		15～40MV·A
110		20～100MV·A
220		≥100MV·A

gongdian dianya piancha

供电电压偏差 (deviation of supply voltage)

在某一时段内，供电电压幅值缓慢变化而偏离额定值的程度。供电电压偏差是电能质量的一项基本指标，其实际偏差取决于电力系统的运行方式、供电阻抗和有功负荷与无功负荷的变化。引起电压偏差的因素有无功功率不足、无功补偿过量、传输距离过长、电力负荷过重和过轻等，其中无功功率不足是造成电压偏差的主要原因。供电电压偏差用电压实际值与额定值之差或其百分数来表示，即

$$\Delta U=U-U_N$$

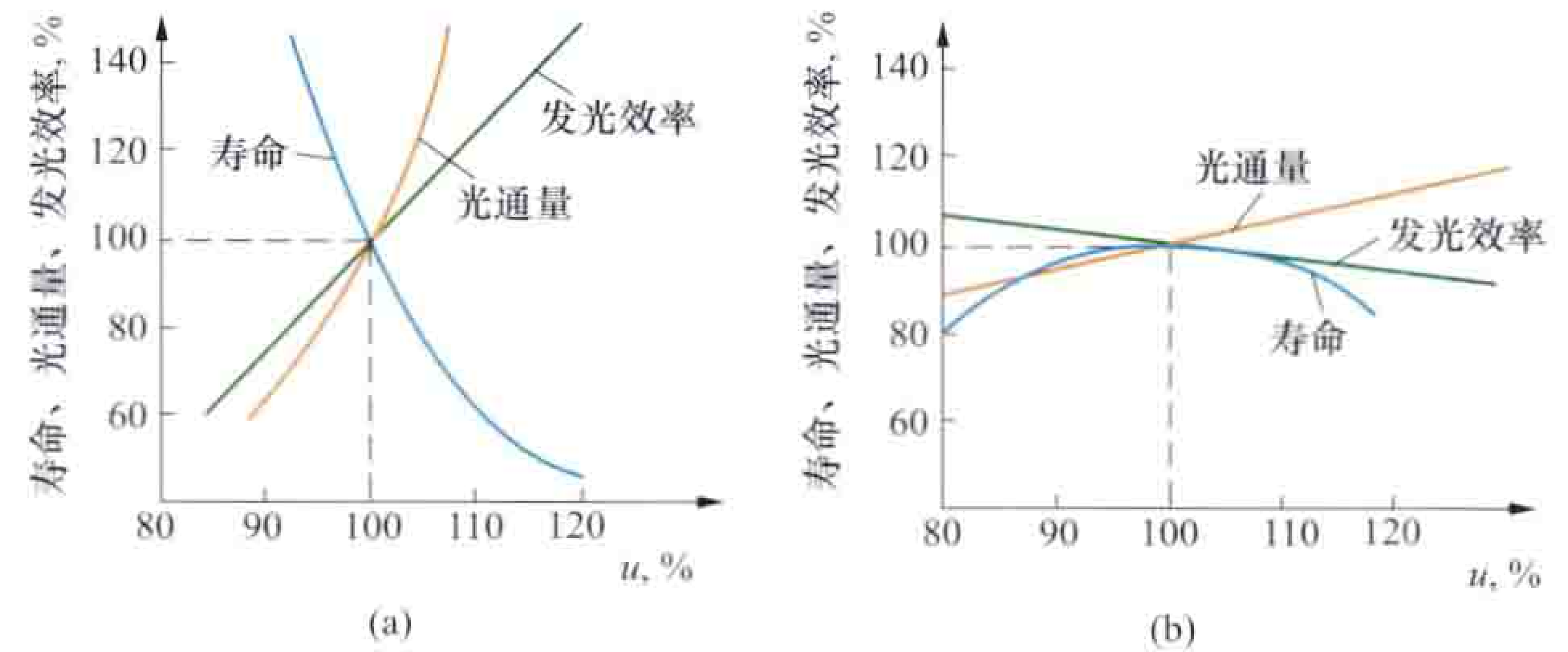
或

$$\Delta U=\frac{U-U_N}{U_N}\times 100\%$$

式中 U 为监测点的电压实际值；U_N 为监测点的电压额定值。

影响　供电电压偏差超标，对电气设备（如照明设备、电动机、变压器、互感器、家用电器及其他用电设备）和电力系统都会带来危害。

（1）对照明设备的影响。照明常用的白炽灯、荧光灯，其发光效率、光通量和使用寿命均与电压有关。照明灯的电压特性曲线如图所示。当电压较额定电压降低5%时，白炽灯的光通量减少18%；当电压降低10%时，光通量减少30%；当电压较额定电压升高5%时，白炽灯的寿命减少30%；当电压升高10%时，寿命减少1/2。



照明灯的电压特性曲线

（a）白炽灯；（b）荧光灯

（2）对电动机的影响。用户中大量使用的异步电动机，当其端电压改变时，电动机的转矩、效率和电流都会发生变化。异步电动机的最大转矩（功率）与端电压的二次方成正比。如电动机在额定电压时的转矩为100%，当端电压为90%额定电压时，其转矩将为额定转矩的81%；如电压降低过多电动机可能停止运转，由它带动的生产设备将不能正常运行。

（3）对变压器、互感器的影响。电压升高时，励磁电流增加，铁芯温升增加，绕组绝缘老化加速；电压降低时，在传输同样功率时，绕组损耗增加。

（4）对并联电容器的影响。电压上升，电场增强，使局部放电加强，导致绝缘寿命降低。如果在额定电压下电容器的使用寿命为20年，则长期在1.1倍额定电压下运行，使用寿命减少到44.48%，仅为8～9年。电压降低使电容器无功功率输出大大降低。电容器的使用寿命还与所加电压波形有关。

（5）对家用电器的影响。对于有动力装置的洗衣机、空调机、电冰箱等家用电器，当电压降低时，其电动机转速降低、电流增大，甚至造成绕组烧毁；当电压过高时，造成绝

缘损坏或由于励磁过大而过电流。对无动力装置的电视机、计算机等家用电器，电压过高，电视机寿命会大大缩短；电压过低，电视机色彩变坏、图像模糊，不能正常运行；电压偏差过大时，计算机和控制设备会出现错误结果或误动。

（6）对其他用电设备的影响。过大的电压偏差在不同程度上影响用电设备的输出功率和使用寿命，会使电耗增加，产品质量下降或报废、产量减少，设备损坏。

（7）对电力系统运行的影响。包括：①电压越低，电力系统的静态稳定功率极限越低，功率极限与线路输送功率的差值（即功率储备）越低，越容易发生系统不稳定现象，会造成系统瓦解的重大事故。②当电网缺乏无功功率，电网运行电压低时，可能因电压不稳定造成系统电压崩溃，也会造成大量用户停电或系统瓦解。③电网低电压运行，会使变压器和线路电流增大，有功损耗和无功损耗大大增加，从而增大供电成本。

电压偏差对用电设备性能的影响见表1。

表1　电压偏差对用电设备性能的影响

电气设备名称	与电压的关系	对性能的影响	
		电压偏差 −10%	电压偏差 +10%
异步电动机			
起动转矩、最大转矩	U^2	−19%	+21%
滑差	U^{-2}	+23%	−17%
起动电流		−(10%～12%)	+(10%～12%)
满载电流	U	+11%	−7%
温升		+(6%～7%)	−(3%～4%)
同步电动机			
最大转矩	U	−10%	+10%
电热设备			
输出热能量	U^2	−19%	+21%
白炽灯			
光通量	$\approx U^{3.6}$	−32%	+39%
寿命	$\approx U^{14}$	+330%	−70%
气体放电灯			
荧光灯光通量	U^2	−20%	+20%
寿命		+35%	−20%
高压汞灯光通量	$\approx U^3$	−27%	+30%
金属卤化物灯光通量	$\approx U^2$	−27%	+30%
高压钠灯光通量		−37%	+50%
移相电容器			
输出无功功率	U^2	−19%	+21%

标准　确定供电电压的允许偏差，主要取决于现有的技术装备水平和投资能力。允许的电压偏差小，有利于用电设备的安全经济运行和供电系统电能损失的减少，但需要改进电网结构，增建无功电源和调压设施，增加了电网投资；允许的电压偏差大，则要求提高电气设备的设计水平，使其对电压水平变化有较强的适应性，因而增加了电气设备的制造投资。

在中国，GB/T 12325—2008《电能质量　供电电压偏差》规定了交流50Hz电力系统在正常运行条件下供电电压对系统标称电压的偏差：①35kV及以上供电电压正、负偏差的绝对值之和不超过标称电压的10%；②20kV及以下三相供电电压允许偏差为标称电压的±7%；③220V单相供电电压允许偏差为标称电压的−10%～+7%；④对供电点短路容量较小、供电距离较长以及对供电电压偏差有特殊要求的用户，由供用电双方协商确定。

其他一些国家、地区和组织对于供电电压允许偏差的规定见表2和表3，一般仅对35kV及以下供电电压做出规定。从表2可以看出，照明用电以±5%左右居多，最大为±10%，动力用电以±10%的居多。德国规定较严，照明为±3%，动力为±5%。

表2　几个工业国家对供电电压允许偏差的规定

国　家	电压允许偏差（%）		
	照明用电	动力用电	农村用电
美　国	±5	±10	
俄罗斯*	+5；−2.5	+10；−5	±5
日　本**	±6（±10）	±10	+9；−7
德　国	±3	±5	±10
英　国	±6	+12；0	
加拿大	+10；−3	+10；−3	+10；−3

* 俄罗斯的标准是指用电设备处电压允许偏差。

** 日本中央电力委员会规定：101V的允许偏差为±6%；202V的允许偏差为±10%。

表3　一些国家和组织对于供电电压允许偏差的规定

国家或组织	电压允许偏差
国际电工委员会（IEC）	100V～35kV为±10%
国际发供电联盟（UNIPEDE）	低压供电网为±10%
法国电力局（EDF）	中压电网为±7%；低压电网电缆供电为±5%；架空线供电为±7.5%；其他为±10%
意大利	±10%
荷　兰	±10%
瑞　典	无全国规定，一般为±5%，最大为±10%
瑞　士	无全国规定，一般为±5%以下
奥地利	无全国规定，通常为±10%
芬　兰	无全国规定，通常城市为±5%，其他地区为±10%
丹　麦	无全国规定，实际白天为±10%，夜间为±5%
挪　威	无全国规定，城市为±5%，其他地区为±10%
波　兰	城市±5%，其他地区为±10%
捷　克	无全国规定，通常为±5%
罗马尼亚	通常±5%，偏僻地区大于±5%
匈牙利	+5%；−10%
希　腊	无全国规定，通常为±7.5%

改善措施　改善电压偏差的主要措施有：①正确选择变

压器的变比和电压分接头；②合理减少线路阻抗；③提高自然功率因数，合理进行无功补偿，并根据电压和用电负荷变化自动调整无功补偿功率；④根据电力系统潮流分布，及时调整系统运行方式；⑤合理配置有载调压手段；⑥改进电网结构，合理缩短供电半径；⑦合理选择监测点，加强电压监测。

gongdian dianyuan

供电电源 (power supply) 能把其他形式的能量转换成电能，并完成供电功能的装置。供电电源常以频率、电压、相数和功率等参数来表征。供电电源一般有正常供电电源、备用供电电源、应急供电电源。用户在申请用电（见用电申请）时，可根据所需的用电容量、可靠性要求程度、受电距离以及当地供电条件来选择其供电电源的参数和数量。当供电企业无法提供用户需要的供电电源的频率、电压、相数时，用户需要自己购置变频或变压、换流等设备予以解决。

在中国，电力系统向用户提供供电电源的频率为交流50Hz；低压单相制为220V（台湾地区为110V），三相制为380V，高压三相三线制为10（20），35（66），110，220kV。在有条件的电力系统中，具有保安负荷或重要负荷的用户，可向供电企业申请双电源或多电源供电。同时，也可自备应急电源，作为正常供电电源中断后的备用电源。

gongdian fang'an

供电方案 (scheme of electric power supply) 向用户实施电力供应的具体计划与措施。供电方案要满足供用电安全可靠、经济合理、运行灵活、管理方便并留有发展裕度的要求，主要根据用户的用电需求、用电时间、用电负荷特性、配电网结构和运行情况，以及现场勘查的信息来确定。供电方案受诸多因素的影响，一般需根据确定的供电方式提出若干个供电方案，经过综合优化比较，选择最佳方案作为确定的供电方案。

供电方案的主要内容是确定供电电压等级，选择供电电源，明确供电方式、计量方式及运行方式等。包括供电电源位置、出线方式，供电线路敷设，供电回路数、走径、跨越、用户进线方式、用户受（送）电装置容量、主接线、继电保护方式、计量方式、运行方式、调度通信等。确定供电方案时，要考虑：①用户受电端有合格的电能质量和适合用户需求的供电可靠性；②满足用户近期和远期对电力的需求；③满足自动装置和保护的需要，且结构简单、操作方便、运行灵活；④符合电网建设、改造和发展规划的要求；⑤技术装备先进，符合技术规范、标准的要求；⑥具有最佳的综合经济效益。供电方案的确定通常是借鉴以往实践经验，在定性分析的基础上采用计算费用法进行分析比较，在可比的条件下，选用年费用最小的方案。

供电方案一经确定，供用电双方即对其承担相应的义务并享有相应的权益。为充分利用供电设备能力，避免发生用户不按计划实施供电方案而造成供电设备能力闲置的不合理现象，中国在《供电营业规则》中做出了供电方案有效期的规定：为新装或增加用电的用户确定的供电方案，高压供电方案的有效期为1年，低压供电方案的有效期为3个月，逾期注销。供电方案有效期是指从供电方案正式通知书发出之日起至受电工程开工之日为止。

gongdian fangshi

供电方式 (electric power supply mode) 电力供应的方法与形式。供电方式是供电企业向电力用户提供的供电电源特性、类型及其管理关系的总称，包括供电电源的频率、额定电压、电源相数、电源容量，供电电源的地点、数量，受电装置位置、进线方式、主接线及运行方式、供电时限以及供用电之间的管理关系等，且随用户对电力需求的多样性和电力系统的供电能力而异。合理的供电方式，对降低供用电工程投资，保证电能质量，提高供电可靠性至关重要。确定供电方式时，应依据国家的能源政策，需保证供用电双方的安全、经济运行并便于管理，充分考虑用户的用电容量、用电性质、用电时间和电力系统规划、当地供电条件等因素，经技术经济比较后确定。

在中国，根据供电电源和供用电管理关系的不同，供电方式分为高压供电方式、低压供电方式、趸售供电方式、委托供电方式、多电源供电方式、临时供电方式。

高压供电方式 以额定1kV以上电压实施的供电。中国从20世纪60年代开始，对电力系统进行改造，除发电厂仍保留3、6.6kV电压外，逐步淘汰了3，6.6，15，22，44kV供电电压，简化了电压等级，减少了输变电设备重复容量，降低了线路损耗，提高了供电能力。高压供电电压有10（20），35（66），110，220kV等系列电压等级。当用户需求的电压不在上述范围时，用户可自行采取措施解决。

低压供电方式 以额定0.4kV及以下电压实施的供电，其供电电压等级主要有0.22kV和0.4kV。低压供电方式有单相低压供电和三相低压供电两类。单相低压供电方式主要适用于照明和单相小动力用户，其最大容量应以不引起供电质量变劣为准则；当造成的影响超过供电质量标准时，需改为三相低压供电方式。三相低压供电方式主要适用于三相小容量用户。低压供电电压等级与用电设备容量或受电变压器总容量的匹配关系见表。

低压供电电压等级与用电设备容量或受电变压器总容量的匹配关系

供电电压等级	用电设备容量	受电变压器总容量
0.22kV	10kW及以下单相设备	
0.4kV	100kW及以下	50kV·A及以下

趸售供电方式 向趸购转售电能的单位实施的供电。从大电网趸购电能，再向其营业区内用户售电的经营方式称为趸购转售。电力的趸售就是批发和零售的关系，它是一种管理关系特殊的供电方式。1989年，中国对1176个县实行趸售供电方式，趸售电量为662.4亿kW·h。到2010年，趸售电量达8600亿kW·h。

委托供电方式 为解决因公用供电设施能力不足或公用配电网未覆盖地区的用户用电，供电企业委托该地区有供电能力的直供高压用户向其他用户实施的供电。委托供电方式可发挥现有供电设备的闲置能力，临时缓解投资紧缺，及时解决用户用电急需，但供用电关系复杂且不利于安全用电、

节约用电和需求侧管理。

多电源供电方式　由两个及以上独立电源向一个用户实施的供电。多电源供电方式具有较高的供电可靠性，适用于有保安负荷的用户。

临时供电方式　向用电期限短暂或非永久性用电实施的供电。现实生活中的基建施工、市政建设、抗旱打井、防汛排涝、集会演出等临时用电都采用这种供电方式。临时用电可采用高压供电方式，也可采用低压供电方式，如何选择主要取决于临时用电容量和用电地点的供电条件。长期以来，中国的临时用电期限为不超过6个月，2003年12月23日，国家发展和改革委员会颁布《关于停止收取供配电贴费有关问题的补充通知》（发改价格〔2003〕2279号）文件，规定临时用电期限一般不超过3年。

gongdian fuwu biaozhun

供电服务标准　（standards of power supply service）

衡量是否满足电力用户需求而确定的服务规范或准则。制定供电服务标准一般应考虑明确性、可衡量性、可行性、及时性和吻合性。

中国的电力法律法规体系，对供电质量要求和供电服务行为等都有明确的规定或标准。《中华人民共和国电力法》《电力供应与使用条例》以及配套的《供电营业规则》，在供电质量、供电方式、抢险救灾以及停止或中止供电、电费计收、电能计量、新装与变更用电等方面的工作程序、质量标准都有相应的规定或规范。国家电监会颁布的《供电监管办法》对供电企业的供电能力、供电质量、供电安全保障、办理用电业务期限、用户受电工程服务要求、停限电或中止供电的条件和程序、故障报修的服务要求和时限、投诉举报的处理程序、供电市场行为、电价和收费标准、服务信息公开等内容也做了具体规定。

中国的供电服务标准可归纳为供电产品质量标准、服务渠道质量标准和服务项目质量标准。①供电产品质量标准通过国家标准颁布，对供电频率允许偏差、供电电压允许偏差、正常电压不平衡度允许值、电压（相电压）总谐波畸变率和停电时间等都做了具体规定。②服务渠道质量标准是由供电企业的企业标准确定的。对供电营业厅、供电服务热线、网上供电营业厅、客户现场、银行及其他代办机构的公示内容、服务时限要求、服务程序等都做出了具体规定。③服务项目质量标准是通过电力法规体系中的部门规章颁布的。对供电方案答复、客户受电工程设计审核、中间检查、竣工检验和送电、高压客户供用电合同文本签订、故障抢修、咨询、投诉和举报受理、停电告知、计量校表、用电指导等业务项目在服务时限、质量标准等方面都做了具体的规定和要求。GB/T 28583—2012《供电服务规范》，对供电企业通用服务规范、供电质量、用电业务办理、抄表及收费、供电故障处理等内容做出了相关规定。

英国的供电服务标准由天然气和电力市场管理局（OFGEM）负责，在咨询有关电力公司、电力客户委员会和其他客户代表意见的基础上制定。该供电服务标准涵盖公共电力供应者向客户提供的配电、供电和电能计量方面的具体指标和内容，分为强制型和整体型两种标准类型。①强制型标准是要求对所有客户都必须达到的服务质量，如果没有做到，供电企业必须按规定向客户支付赔偿金。这类标准包括服务项目、时限要求和惩罚标准。②整体型标准是客户有权要求电力供应者事先确定一个最低程度的质量标准，要求每家电力公司向客户提供执行整体型服务标准的具体指标。2000年英国出台的《公用事业法》，对电力供应企业和配电企业应履行的供电服务提出了更明确清晰的标准和要求。

gongdian fuwu qudao

供电服务渠道　（channels of power supply service）

供电企业向用户提供服务并进行信息交互的方式或途径。供电服务渠道是开展服务项目的载体，包括供电企业的服务环境、设施、人员及可利用的社会资源等。供电服务渠道需充分运用信息化、互联网及通信技术，全面适应社会进步和客户需求的不断变化，拓展并丰富交互式和自助式服务项目，体现人性化，满足便捷性和安全性的需要。图1所示为自助用电服务终端，图2所示为手持用电服务终端。



图1　自助用电服务终端



图2　手持用电服务终端

供电服务渠道主要包括供电营业厅、供电服务热线、网上供电营业厅、客户现场服务、社区服务等。

供电营业厅　供电企业为客户办理用电业务而设置的场所，也称供电营业网点。供电营业厅的布设需综合考虑所服务客户的类型、数量及服务半径、交通便利、容易识别等因素，其功能应以柜台服务和自助服务相结合，为客户提供各类供用电资料、各项用电咨询、各项用电业务办理等。

供电服务热线　供电企业为客户提供的快捷专用服务电话。供电服务热线不受时间及区域限制，全天候为客户提供电力故障报修、用电业务咨询、电费电价查询、投诉举报受理以及可简单受理或需及时处理的用电服务。2002年，中国境内设定“95598”为全国统一的供电特服号码，95598供电服务热线成为客户服务的重要渠道。

网上供电营业厅　供电企业为客户提供的网络服务平台。通过网上供电营业厅可以向客户提供电费缴纳、业务咨询查询、投诉举报受理等服务项目。中国供电企业的网上营业厅也是以95598命名的网站。

客户现场服务　供电企业派工作人员到客户用电现场实施服务的方式。客户现场服务的主要内容是与电网、用电设备及电能计量装置有关的现场处理工作，包括故障抢修，电能表电量抄见，电能表安装、校验以及用电业务咨询等。图3所示为国家电网公司移动营业厅。

社区服务　供电企业与社区共同设置的服务场所。客户可在其居住的社区接受电费缴纳、用电业务咨询与查询、投诉举报受理等服务，供电企业还可利用社区资源开展用电宣传等工作。



图 3　国家电网公司移动营业厅

gongdian fuwu rexian

供电服务热线　(power supply service hotline)
供电企业为其用户提供的快捷专用服务电话，也称供电服务呼叫中心，是供电服务的重要渠道之一。供电服务热线应用自动呼叫分配（ACD）、交互式语音应答（IVR）、计算机电话集成（CTI）等计算机通信技术，实现了大规模话务的同时受理，具有方便、快捷、7×24 小时全天候等特点。

世界各国的电力企业均设有专门的供电服务热线。2002 年，中国境内设定“95598”为全国统一的供电特服号码。供电服务热线提供的服务内容主要包括信息查询和诉求受理两大类。信息查询类包括停电范围、电费查询、网点信息、服务承诺、法律法规、用电知识等；诉求受理类包括业务咨询、业务申请、故障报修、服务投诉、窃电举报等。通过供电服务热线，还可以开展客户回访、满意度调查等主动呼出业务，见图。



95598 供电服务热线

供电服务热线的开通，提高了供电企业服务水平和运营效率。随着信息技术的快速发展，供电服务热线除提供传统的电话服务外，传真、短信、电子邮件、即时通信工具、视频等多媒体技术也得到了广泛应用。

gongdian fuwu xiangmu

供电服务项目　(items of power supply service)
供电企业为用户提供的服务内容。供电服务项目通过供电企业内部服务资源调配，社会化服务资源融合，以及相应的供电服务渠道载体而实现。

在中国，供电服务项目可分为业扩类服务、电费类服务、计量类服务、信息类服务及其他类服务等。

业扩类服务　为满足用户用电新装、增容（见新装增容）及变更用电需求提供的服务。这类服务一般通过供电营业厅、用户现场服务渠道实现。包括受理用户的用电新装、增容及变更用电需求并办理相关手续，以及需进行现场处理的服务工作。

电费类服务　为方便用户缴纳电费提供的服务。这类服务一般通过供电营业厅、网上供电营业厅、社区服务、社会化服务资源等渠道实现。包括：①账单服务。按照用户需要及定制方式为其提供电费账单和发票。②缴费服务。按照用户需要为其提供现金、储蓄、刷卡、转账等多种结算方式及缴费渠道的服务。③欠费告知服务。通过电话、邮寄、送单或用户定制的方式，提供欠费告知、欠费停电等信息，提醒用户及时缴纳电费的服务。

计量类服务　为保证电能计量装置正常运行提供的服务。这类服务一般通过供电营业厅、用户现场服务等渠道实现。包括：①校验电能表服务。根据用户提出对有异议电能表进行校验的要求，提供现场校表服务。②计量故障处理服务。对用户端发生的计量故障，提供电能表拆、装、换等现场处理服务。③轮换电能表告知服务。通过电话等方式，对 10kV 及以上高压用户提供电能表轮换计划告知及现场核对服务。

信息类服务　为满足用户方便、及时获取各类供用电信息提供的服务。这类服务一般通过供电营业厅、供电服务热线、网上供电营业厅等渠道实现。包括：①咨询查询服务。向用户提供用电政策及业务咨询、用电信息查询、电量电费、线路停电情况、用电业务流程及进度、用电常识、营业网点、服务项目等信息的咨询查询服务。②信息公告服务。向用户提供用电政策法规、供电服务承诺、电价、用电业务指南、计划停电预告、用电常识、营业网点、电气技术标准或规范、新服务项目介绍、企业形象介绍等信息的公告服务。③信息订阅服务。以短信、E-mail 等方式为用户提供电量电费、停电、负荷情况等信息的订阅服务。④投诉、举报和建议受理服务。向用户提供投诉、举报和建议受理，并在规定时限内向用户反馈处理情况等服务。

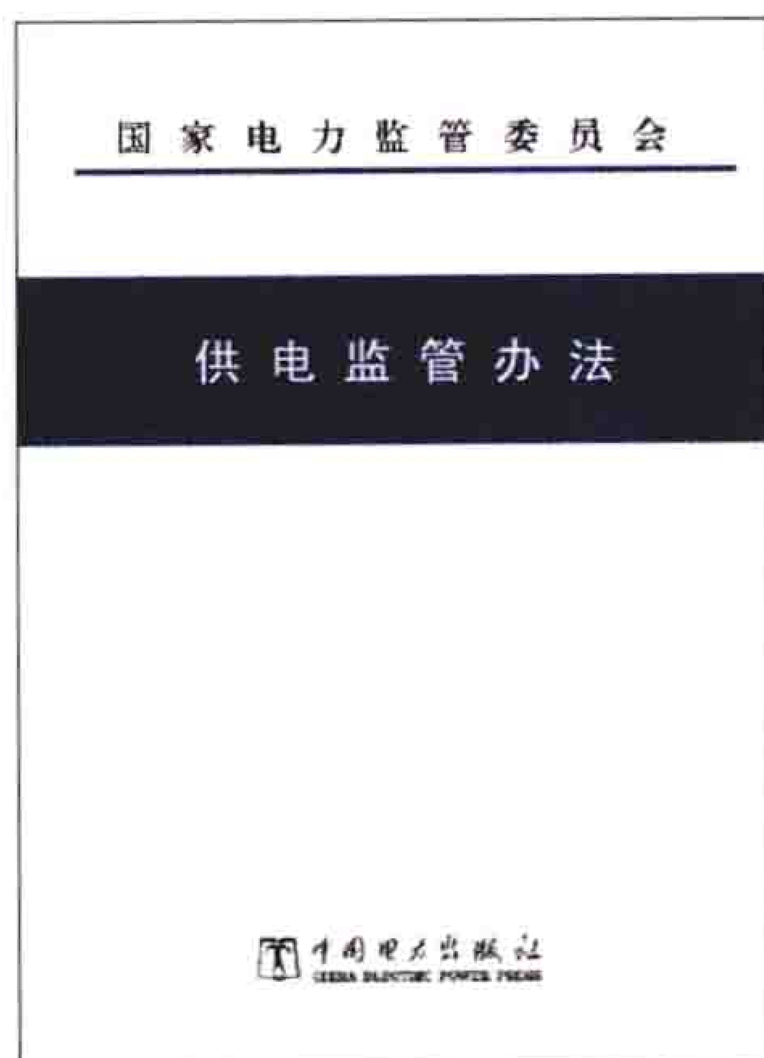
其他类服务　这类服务一般通过用户现场服务渠道实现。包括：①故障抢修服务。②用电指导服务。③重要用户停限电告知服务。④专线用户停电协商服务。⑤保供电服务。

Gongdian Jianguan Banfa

《供电监管办法》　(*Supervision Regulation for Electric Power Supply*)　电力监管机构履行供电监管职能的规范性文件。《供电监管办法》由国家电力监管委员会颁布，于 2010 年 1 月 1 日正式施行。《供电监管办法》根据《电力监管条例》和国家有关规定制定，旨在规范供电行为，维护供电市场秩序，保护电力使用者的合法权益和社会公共利益。

《供电监管办法》规定，供电企业应当依法从事供电业务，并接受电力监管机构的监管。电力监管机构履行供电监管和行政执法职能，并可以向社会公布供电企业违反国家有关供电监管规定、损害用户合法权益和社会公共利益的行为及其处理情况。《供电监管办法》共 5 章 40 条，对供电监管的目的、对象和原则，监管内容、监管措施以及罚则等做了明确规定。

第一章：总则，共5条。分别对立法目的、供电监管机制、供电监管原则、供电监管对象以及对违法行为投诉举报作了原则规定。



第二章：监管内容，共20条。分别对监管供电企业的供电能力、供电质量、供电安全保障、供电服务、供电市场行为、执行国家规定的成本规则、执行国家规定的电力行政许可规定、节能减排等20项监管内容进行了详细规定。

第三章：监管措施，共6条。分别明确了电力监管机构包括信息报送、文件资料审查、现场检查、用户满意度调查等各项监管措施。

第四章：罚则，共7条。分别明确了行为人应当承担的行政责任和刑事责任等法律责任。

第五章：附则，共2条。分别对“以上、以下、不低于、不超过”等含义进行了定义并规定了办法的施行时间。

gongdian kekaoxing

供电可靠性　(power supply reliability)　供电系统对用户连续供电的能力，也称用户供电可靠性，由供电可靠性指标来量度。供电可靠性指标反映了供电系统对用户电力需求的满足程度，是衡量供电系统规划建设、运行管理与技术装备水平的重要指标。

供电可靠性指标　主要包括用户平均停电时间、供电可靠率、用户平均停电次数以及用户平均短时停电次数。

用户平均停电时间　用户在统计期内的平均停电小时。分别以考虑一切影响、不计外部影响（供电企业管辖范围以外的电网或设施等故障引起的停电）、不计电源容量不足限电而分别记作$t_{\mathrm{AIHC\text{-}1}}$、$t_{\mathrm{AIHC\text{-}2}}$和$t_{\mathrm{AIHC\text{-}3}}$。

供电可靠率　在统计期内对用户有效供电时间总小时数与统计期内小时数的比值，用百分数表示。分别以考虑一切影响、不计外部影响、不计电源容量不足限电的影响而分别记作$k_{\mathrm{RS\text{-}1}}$、$k_{\mathrm{RS\text{-}2}}$和$k_{\mathrm{RS\text{-}3}}$。

用户平均停电次数　用户在统计期内的平均停电次数。分别以考虑一切影响、不计外部影响、不计电源容量不足限电的影响而分别记作$t_{\mathrm{AITC\text{-}1}}$、$t_{\mathrm{AITC\text{-}2}}$和$t_{\mathrm{AITC\text{-}3}}$。

用户平均短时停电次数　用户在统计期内的历时在数秒或数分钟以内的平均短时停电次数。一次短时停电指的是一次历时在规定时间内的供电中断事件。界定短时停电的一个重要参数是停电历时。DL/T 836—2012《供电系统用户供电可靠性评价规程》将短时停电纳入供电可靠性考虑指标的统计，并将历时的上限标准定为3min。

供电可靠性监管　国家电力监管机构对供电企业的供电可靠性进行监督并促使其供电可靠性指标达到规定要求的管理活动。主要包括提出供电可靠性指标的要求、供电可靠性指标的统计与发布、促使供电企业提高供电可靠性的措施等内容。

供电可靠性指标的要求　根据供电系统投资与停电损失以及已经达到的供电可靠性水平，由电力监管机构综合平衡供电企业与用户的利益，提出供电可靠性指标的最低要求。中国电力监管委员会于2009年发布的《供电监管办法》要求城区供电可靠率不低于99.00%（相当于用户平均停电时间为87.6h）。英国电监会在2008/2009财政年度为伦敦供电公司提出的用户平均停电时间与每百个用户平均停电次数考核目标分别为40.1min与36.2次，为中东部网络公司提出的考核目标分别是70min与76.7次。

供电可靠性指标的统计与发布　对供电可靠性指标进行统计、分析并向社会发布的活动。在中国，由中国电力可靠性管理中心负责供电可靠性指标的统计与发布，每年召开一次发布会，向社会公开发布城市用户、农村用户供电可靠性指标以及停电原因分析情况等。

促使供电企业提高供电可靠性的措施　主要有法律强制和经济激励措施。法律强制措施指与供电企业签署特许经营权协议，把满足供电可靠性要求作为经营权的首要条件。经济激励措施指根据供电可靠性指标进行奖励或罚款，以充分调动供电企业提高供电可靠性的积极性。在一些发达国家，有与停电时间和停电次数挂钩、与停电持续时间挂钩、与缺供电量挂钩的经济激励措施。

(1) 与停电时间和停电次数挂钩的经济激励措施。电力监管机构根据用户平均停电时间和平均停电次数对供电企业进行奖励或罚款。在实际考核指标低于目标值时，对供电企业进行奖励，奖金额度随减少的指标值线性增加，直至指标达到一个下限值时封顶；与之类似，实际考核指标高于目标值时，对供电企业进行罚款，罚款额度随高出的指标值线性增加，直至指标达到一个上限值时截止。有的监管办法则是设定了一个奖罚“盲区”，当实际的供电可靠性位于这个“盲区”时，供电企业既不被罚款，也不获得奖励。

英国电监会在2005年实施的供电可靠性奖惩办法规定，对停电时间的奖励与罚款区间分别是目标值两侧的30%，对停电次数的奖励与罚款的区间分别是目标值上下的25%。2008/2009财政年度为伦敦供电公司制定的停电时间与停电次数奖惩费率分别为33万英镑/min与29万英镑/次。

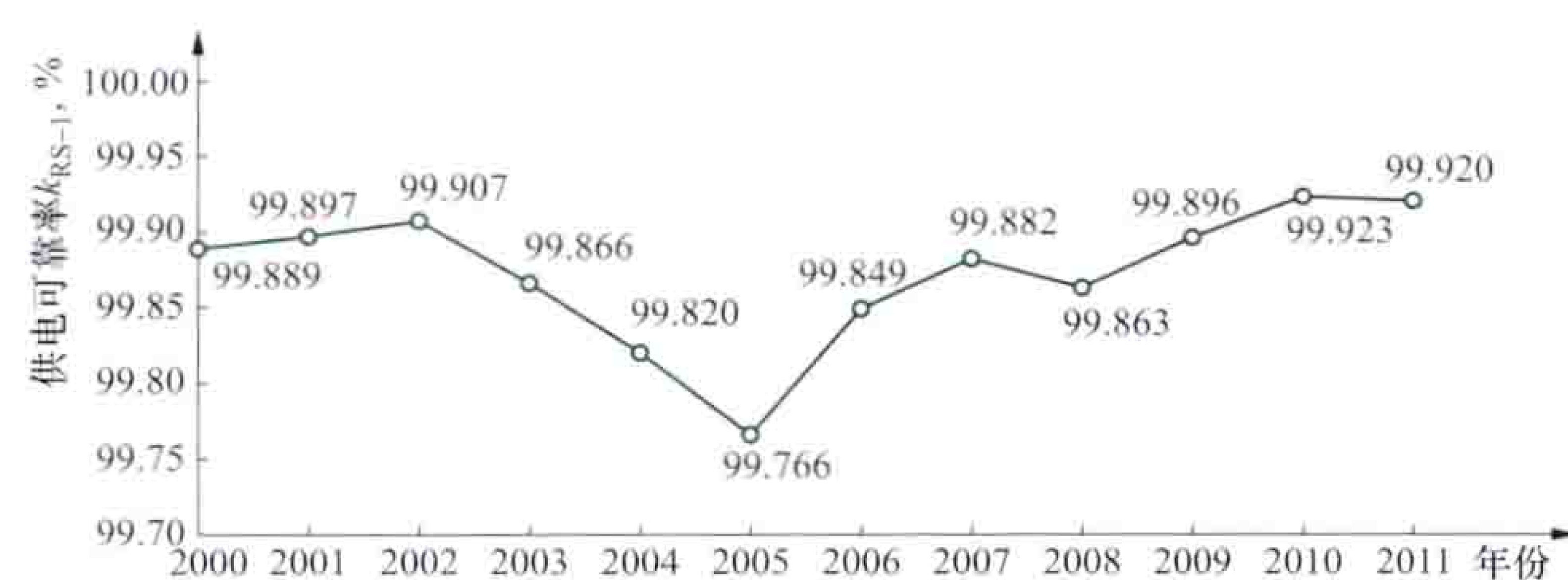
(2) 与停电持续时间挂钩的经济激励措施。在单次停电持续时间超过允许的规定时，供电企业向用户支付现金罚款作为停电损失补偿。罚款额度与用户性质有关，商业用户的停电损失一般比较大，所以获得补偿最多；工业用户次之；而居民用户停电损失较小，得到的补偿最少。英国电监会于2004年制定的服务质量标准要求电网故障恢复供电时间不得超过18h，否则将向每个居民用户支付50英镑、非居民用户支付100英镑的现金罚款，停电时间每再增加12h，罚款增加25英镑。

(3) 与缺供电量挂钩的经济激励措施。供电企业根据因停电缺供的电量向用户支付成比例的罚款。罚款费率与负荷性质挂钩。缺供电量根据停电时负荷水平和用

户平均负荷水平计算。挪威政府于2006年实施的激励措施采取与缺供电量挂钩的方案，规定对商业工业用户停电的罚款是38挪威克朗/（kW·h），居民用户是2挪威克朗/(kW·h)。

供电企业提高供电可靠性的措施 包括技术措施和管理措施。技术措施包括优化配电网网架结构、合理规划配电网中性点接地方式、合理配置配电网继电保护以及推广使用配电设备状态检修与带电检修、配电网不停电作业、配电自动化、柔性配电、故障限流等配电技术措施。管理措施包括减少预安排停电时间、进行需求侧管理、加强配电网反外力损坏工作等方面。统计结果表明，在用户遭受的平均停电时间中，近90%的是由配电网的原因引起的，因此，提高供电可靠性，应重点提高配电网的技术装备与运行管理水平。（见供电可靠性管理）

中国供电可靠性水平 2000年以来中国城市供电可靠率如图所示。自2005年以来，中国城市供电可靠率持续上升，至2010年，达到了自1985年开展供电可靠率统计以来的最高值（为99.923%），这一水平相当于中国城市用户平均停电时间为6.722h。2011年中国各省（区、市）电力（网）公司供电可靠性指标见表1。



2000～2011年中国城市供电可靠率

表1 2011年中国各省（区、市）电力（网）公司供电可靠性指标

单位	供电可靠率（%）			用户平均停电时间（h/户）		
	k_{RS-1}	k_{RS-2}	k_{RS-3}	t_{AIHC-1}	t_{AIHC-2}	t_{AIHC-3}
国家电网公司	99.9210	99.9274	99.9234	6.92	6.36	6.71
华北区域	99.9575	99.9610	99.9584	3.72	3.42	3.65
华北电网公司直属	99.9251	99.9303	99.9251	6.56	6.11	6.56
北京市电力公司	99.9813	99.9832	99.9813	1.64	1.47	1.64
河北省电力公司	99.9309	99.9352	99.9309	6.06	5.68	6.06
山西省电力公司	99.9105	99.9223	99.9181	7.84	6.81	7.17
天津市电力公司	99.9712	99.9745	99.9712	2.52	2.24	2.52
山东电力集团公司	99.9702	99.9710	99.9702	2.61	2.54	2.61
东北区域	99.9259	99.9313	99.9264	6.49	6.02	6.45
辽宁省电力公司	99.9535	99.9551	99.9535	4.07	3.93	4.07
吉林省电力公司	99.9249	99.9279	99.9249	6.58	6.32	6.58
黑龙江省电力公司	99.8936	99.9062	99.8936	9.32	8.22	9.32
蒙东电力公司	99.8153	99.8345	99.8241	16.18	14.49	15.41
华东区域	99.9577	99.9610	99.9581	3.70	3.42	3.67
上海市电力公司	99.9832	99.9841	99.9833	1.47	1.40	1.46
江苏省电力公司	99.9526	99.9565	99.9527	4.16	3.81	4.14
浙江省电力公司	99.9729	99.9760	99.9746	2.37	2.10	2.22
安徽省电力公司	99.9473	99.9512	99.9475	4.62	4.28	4.60
福建省电力有限公司	99.9379	99.9414	99.9379	5.44	5.14	5.44
华中区域	99.9401	99.9500	99.9457	5.25	4.38	4.75
河南省电力公司	99.9562	99.9613	99.9565	3.83	3.39	3.81
湖北省电力公司	99.9450	99.9500	99.9455	4.82	4.38	4.77
湖南省电力公司	99.9430	99.9698	99.9676	5.00	2.65	2.84
江西省电力公司	99.9403	99.9487	99.9424	5.23	4.49	5.05
四川省电力公司	99.9182	99.9237	99.9183	7.17	6.69	7.16
重庆市电力公司	99.9286	99.9392	99.9361	6.25	5.33	5.60
西北区域	99.9059	99.9125	99.9060	8.24	7.66	8.23
陕西省电力公司	99.9287	99.9338	99.9288	6.25	5.80	6.23
甘肃省电力公司	99.9209	99.9289	99.9209	6.93	6.23	6.93
青海省电力公司	99.8559	99.8717	99.8559	12.63	11.24	12.63
宁夏电力公司	99.9427	99.9446	99.9427	5.02	4.85	5.02
新疆电力公司	99.8766	99.8829	99.8767	10.81	10.26	10.80
中国南方电网有限责任公司	99.9407	99.9545	99.9505	5.20	3.98	4.33
广东电网公司	99.9761	99.9787	99.9764	2.09	1.86	2.07
广西电网公司	99.8552	99.9312	99.9258	12.68	6.02	6.50
云南电网公司	99.9335	99.9402	99.9356	5.83	5.24	5.64
贵州电网公司	99.8842	99.8923	99.8842	10.15	9.44	10.15
海南电网公司	99.8468	99.8583	99.8469	13.42	12.41	13.41

国际供电可靠性水平 发达国家的供电可靠性水平较高。日本东京、新加坡城市用户平均停电时间均低于5min，供电可靠率超过99.999%（5个9）；意大利、英国、德国、澳大利亚、韩国等国用户平均停电时间都低于50min，供电可靠率超过了99.99%（4个9）；美国供电可靠性相对较低，用户平均停电时间低于110min，供电可靠率达到99.979%。表2给出了发达国家（城市）供电可靠性指标。

表 2　发达国家（城市）供电可靠性指标

国家（城市）	k_{RS-1}（%）	t_{AIHC-1}（min/户）	年度	数据来源
美国	99.979	108	2012	PG&E Company 2012 Annual Electric Reliability Report
法国	99.986	75	2012	The EDF Group Annual Financial Report 2012
加拿大温莎市	99.989	58.7	2010	北美地区电力可靠性考察报告——中国电力可靠性管理中心
意大利	99.991	46	2012	ENEL Annual Report 2012
英国	99.992	42.4	2011	UK Power Networks Annual Review 2011
德国	99.993	35	2012	E. ON Fact&Figures 2013
澳大利亚珀斯	99.995	25	2012	Western Power Annual Reliability and Power Quality Report-1 July 2011-30 June 2012
韩国	99.998	12.4	2011	KEPCo 2012 Annual Report
东京	99.999	2	2009	http://www.tepco.co.jp
新加坡	99.999	0.31	2011	Singapore Power Annual Report 2011

gongdian kekaoxing guanli

供电可靠性管理　(power supply reliability management)　供电企业为提高供电系统对用户持续供电的能力而开展的管理活动，又称用户供电可靠性管理。通过对供电可靠性指标进行统计与分析，采取相应的技术与管理措施，使供电可靠性达到供电企业设定目标，是供电企业运行管理的重要内容。供电企业根据国家电力监管机构的要求、用户对供电可靠性的要求以及本企业电网具体技术条件设定供电可靠性目标。

供电可靠性统计　根据停电记录，计算一个供电区域在一段选定的时间段内的供电可靠性指标。DL/T 836—2012《供电系统用户供电可靠性评价规程》规定的统计指标主要有用户平均停电时间、供电可靠率、用户平均停电次数、用户平均短时停电次数等。中国供电可靠性统计自1985年开始，已经积累了大量的数据资料。由于统计办法经历多次修订，统计数据指标的基础在各个时期有所不同，数据指标的内容也略有不同。中国供电可靠性的统计是以中压配电线路上的公用变压器作为用户统计单位进行的。国际上供电可靠性的统计一般以实际的用户（包括低压用户）作为统计单位，因此能够更加准确地反映供电系统对用户连续供电的能力。

供电可靠性分析　包括基础资料分析、供电可靠性指标分析以及停电原因分析。其目的是明确影响供电可靠性的主要因素，提出提高供电可靠性的方向和途径；通过编制可靠性指标诊断分析报告，针对技术与管理上存在问题，提出相应的改进措施。

基础资料分析　对自然概况、企业概况、配电网及设备状况等影响供电可靠性的因素进行分析。①自然概况包括地理位置、地理特征、气候特征、行政区域、人口构成及政治经济因素等。②企业概况包括企业规模、企业生产及经营模式等。③配电网及设备状况包括配电网网架结构、接线方式、运行方式以及配电设备等基本情况。

供电可靠性指标分析　包括纵向对比分析和横向对比分析。①纵向对比分析。对供电可靠性同一特征指标或同一分类指标的不同年度之间进行对比，对指标变化的趋势和变化幅度进行分析。②横向对比分析。对供电可靠性同一特征指标或同一分类指标与评价单位所在区域的供电企业指标平均值进行对比，对偏差较大的指标进行分析。

停电原因分析　包括故障停电原因分析、预安排停电原因分析。对配电网设备故障对停电的影响以及引起故障的原因进行分类、对比，发现存在的问题，提出改进和防范措施。对检修、施工、用户申请、调电、限电等预安排停电因素造成的停电进行分类分析，按对停电的影响大小进行排序，提出加强预安排停电管理工作的改进措施。

提高供电可靠性措施　包括技术措施和管理措施。配电网直接面向用户，对供电可靠性有着决定性的影响。在用户遭受的平均停电时间中，近90%是由配电网的原因引起的，因此，提高供电可靠性，应重点提高配电网的技术装备与运行管理水平。

技术措施　①优化配电网网架结构及接线方式，提高线路互供能力。②加大架空配电线路的电缆化改造力度，提高抵御自然灾害和外力破坏的能力。③推广配电设备状态检修与带电检修（见配电网设备检修）、配电网不停电作业技术，提高系统的运行可靠性，减少停电检修时间。④合理配置配电网继电保护，减小故障影响范围。⑤采用配电网中性点非有效接地方式（见中压配电网中性点接地方式），减少单相接地故障跳闸率。⑥实施配电自动化，缩短故障查找、修复和恢复供电时间。⑦推广使用柔性配电技术与配电网故障限流技术，解决传统配电网设备难以克服的技术问题。

管理措施　①加强供电可靠性指标统计、分析、评估工作，找出影响供电可靠性的直接原因并进行预控。②加强预安排停电管理，统筹安排停电计划，制定标准化作业，严格控制重复停电。③积极探索需求侧管理方法，提高电能利用效率，实现科学用电、节约用电、有序用电。④加强施工及检修监管，确保质量与效率。⑤加大宣传力度，保护电力设施，加强防外力损坏工作。

gongdian tiefei

供电贴费　(capital contribution of power supply)　新用户或原有用户增加用电容量需分担的用户厂（场）外供电工程建设费用。一些国家和地区都经历了依照本国的国家法令、行政法规或经政府批准（或同意）的办法，以供电贴费的方式作为城市和乡村电网建设资金的渠道之一，用于供用电设施建设。

国际供电贴费情况　为了减少对新兴的供电地区一次性建设投资，采取由该地区用户集资建设新区公用供电设施办法的国家有日本、加拿大等。日本政府批准由供电企业承担新用户供电工程投资的限额，根据向用户提供的供电设备是一般供电设备还是特殊供电设备而异。属于一般供电设备的，供电企业和用户按比例各自负担相应的资金限额；特殊供电设备（根据用户要求超过标准设计的设备、备用供电设备、专用供电设备等）原则上全部由用户负担。加拿大的安

大略水电局对新区有新增供电工程的用户，根据该用户需要的送电距离和利用该工程同时申请用电户的数量，以新增工程决算为基础，对具体用户分别按送电距离核定其分担费用。投入运行后，当该地区又有新增用户时，再向新用户核收分担费用并相应退还用户由于分摊工程费用户数增多应核减的费用，但退还时要扣除已折旧部分的资金。

中国供电贴费模式　中华人民共和国成立后，曾规定按电网电压等级区分投资责任，其中电压为10kV及以下的供电工程，均由申请用电的用户投资建设。1963年，对10kV及以下公用及专用配电网的建设，由电力部门向用户按照申请用电容量和统一的贴费标准收取供电贴费并负责供电。1982年，将供电贴费扩大到110kV以下的用户，1993年又扩大到110kV的用户。2000年6月，国家规定将收取贴费的标准降低一半；2002年1月，停止收取供电贴费。为合理配置电力资源并提高用户供电可靠性，2003年12月，国家规定可以收取高可靠性供电费用。

高可靠性供电费用指申请新装及增加用电容量的两路及以上多回路供电（含备用电源、保安电源）的用户，在国家没有统一出台高可靠性电价政策前，除供电容量最大的供电回路外，对其余供电回路收取的供电费用。高可靠性供电费用根据用户受电电压等级、供电方式（架空线路、电缆线路）、供电容量及单位容量收费标准确定，其中供电容量为其余供电回路容量的总和。

Gongdian Yingye Guize

《供电营业规则》　(*Regulations on Electric Power Supply and Marketing*)　为依法施行电力供应与使用而制定的规范性文件，也称供用电规则。电能商品的特殊性表现为：①供应方式与一般商品不同，需要有供电网络，其供应量需要采用专用的法定计量器具来记录；②电能的使用与供应需同时进行，不可储存，使用者也需建设一定的供电设施后才可使用；③电能质量不只是与供应者有关，还与使用者的用电行为有关；④电能供应者在其供应区域内具有垄断性，并承担随时满足使用者需求的责任。因此，世界上所有的供电企业都有各自所需遵循的供用电规则。

供用电规则的法律效力一般是经法律授权的行政机关批准而获得的。日本称为《供电规程》，由各电力公司依据日本《电气事业法》的规定制定，经通商产业大臣认可而生效。加拿大称为《供用电规则》，也由各电力公司根据加拿大的《电力公司法》和《公用事业法》制定，经法律授权的地方议会批准而生效。中国称为《供电营业规则》，根据国务院颁布的《电力供应与使用条例》和国家有关规定，由原电力工业部制定并发布施行，是行政规章。

各国的供用电规则一般都包括总则、供电方式、用电申请、产权划分及维护、供用电安全、电能计量及电费、供用电合同以及附则等内容。①总则阐述立法依据、适用范围及定义等内容。②供电方式明确供电电源属性、供电方式的确定及各类供电方式的适用对象等内容。③用电申请则明确办理新装用电、增加用电或变更用电所需的手续、程序，以及用电资料、工程设计施工及费用负担等内容。④产权划分及维护主要明确供电设施产权归属及划分、运行维护责任等内容。⑤供用电安全主要明确供电设施检修配合、安全检查、供电事故调查处理等内容。⑥电能计量及电费主要规定电能计量方式、计量误差处理、电价、抄表及收缴电费等内容。⑦供用电合同主要规定供用电合同订立、经济责任承担等内容。⑧附则主要规定生效日期等内容。

中国供电营业规则　从中华人民共和国成立至今，中国的供用电规则先后修订发布过6次。①1953年，燃料工业部制定了《供用电暂行规则》，经政务院财政经济委员会于1953年8月29日批准生效，仅适用于燃料工业部所属电业局的供电区域。该规则共12章112条。②1963年，水利电力部对《供用电暂行规则》做了修改，经国家经济委员会于1963年9月23日批准施行，取名为《全国供用电规则》，适用于水利电力系统及各省（直辖市、自治区）管辖的电业局的供电区域，共11章96条。③1966年，水利电力部对1963年颁发实施的《全国供用电规则》进行修改，取名为《全国供用电规则（试行本）》，共8章50条，同时随正文附有4个附录及使用说明，这部规则没有批准机关。④1972年，水利电力部对1966年版本再次做了修改，经国家计划革命委员会于1972年7月24日批准生效，取名为《供用电规则（试行本）》，共5章42条。⑤1983年，水利电力部对1972年版本又做了修改，经国家经济委员会于1983年8月25日批准生效，取名为《全国供用电规则》，共11章87条，并在其后附有《用电监察条例》（见用电检查），同时还发布了《全国供用电规则条文解释》。⑥1996年，国务院发布并施行《电力供应与使用条例》，电力工业部根据《中华人民共和国电力法》《电力供应与使用条例》以及国家有关规定，按照建立社会主义市场经济体制和政企分开的原则，对电力供应与使用活动中的具体行为和操作程序进行了重新制定与规范，取名为《供电营业规则》，作为《电力供应与使用条例》5个配套的规章之一，于1996年10月8日由中华人民共和国电力工业部发布施行，共10章107条。包括总则、供电方式、新装增容与变更用电、受电设施建设与维护管理、供电质量与安全供用电、用电计量与电费计收、并网电厂、供用电合同与违约责任、窃电的制止与处理、附则等章节及条款内容。该规则在对供用电业务及技术处理进行具体规范的同时，还对供用电双方的权利义务做出了明确规定。对供电质量标准、供配电设施的运行维护管理责任、供电企业对用户中止供电的程序、并网协议及并网电量购销合同、供用电合同的必备条款及形式以及承担违约责任的具体计算方法等方面的规定，都比《全国供用电规则》更具体，更便于实际操作。

香港是中华人民共和国特别行政区，电力公司施行的《供电则例》是以政府颁布的电力条例为依据，按照管制法则约定的权利和义务制定的。香港中华电力公司是香港地区三个供电公司之一，1997年3月，新修订公布的《供电则例》共5章45条，包括一般资料、供电条件、客户装置的配合和其他规定、附录等。内容主要由一般性条件和供电技术条件两部分组成，从用户办理供电申请至成为中华电力公司的正式用户至终止供电的整个过程，都规定了应享有的权利义务，同时也规定了供电方式、电压、频率、功率因数、谐波等方面的技术标准及相应承担的法律责任，内容详细，都可操作，并对本公司职工也做出严格的纪律规定。香港中华电力公司对《供电则例》的修改是通过报刊登载，公布于

众后执行的。

台湾电力公司负责台湾本岛、澎湖、金门和马祖的电力供应，在台湾的电力产业上具有独占地位。1948 年 3 月根据台湾《电业法》第 59 条规定，制定了《营业规则》，其后经过 30 多次修订，并经过上级部门核准后执行。台湾电力公司《营业规则》分为总则、申请用电、供电方式与工程、用电及供电、配电场所之设置、电费之计收、线路辅助费、线路变更设置费、稽查用电、用电设备之租用、附则等 11 章共 105 条。为细化《营业规则》，便于实际操作，台湾电力公司在 1990 年 6 月 28 日还公布了《营业规则施行细则》，已经过了 34 次修订。

日本东京电力公司供电规程　东京电力公司是日本九大电力公司之一。该公司根据日本《电气事业法》第 19 条第 1 款的规定，制定了《供电规程》，并经过通商产业大臣批准后执行。东京电力公司的《供电规程》共有 10 章 88 条，其章节是：总则、供用电合同的申办、合同种类及费用、电费的计算及支付、用电及供电、改变合同及合同终止、供电方法及有关工程、工程费用的负担、保安、附则。该公司在 1989 年 4 月 1 日还公布了《供电规程执行细则》，便于更好地实际操作。

加拿大安大略省水电局供用电规则　加拿大安大略省水电局《供用电规则》根据《电力公司法》《公用事业法》等法律有关条文制定。该规则分为：总则、供电方式、新装与增容、维护管理与产权分界、用户服务和安全供用电、电表计量、电价与收费、合同与非合同供电、供电资产债务处理等 9 章共 68 条。

gongdian yingyequ

供电营业区　(business area of power supply)　从事电力供应和营销活动的法定地域。凡是有可能用电的地域都可能成为供电企业经销电力的市场。如果出现有两个及以上供电企业对同一个地区供电，势必造成重复建设、交叉供电、网中套网的局面，不但严重影响供用电的公共安全，危及电网安全运行，而且会造成国家资源的巨大浪费。因此，世界各国都曾通过立法划定供电营业区，并规定在法定供电营业区内只授予一个供电企业的供电专营权，其他供电企业不得侵入进行供电营销，并规定供电企业必须承担所属供电营业区内用电者用电需求的义务。

日本在 1978 年公布的《电气事业法》中规定“经营电气者，必须经通商产业大臣的许可”，“由通商产业大臣交付许可证”。英国在 1989 年颁布的《电力法》中规定了对发电、输电、供电经营者发放许可证，实行供电许可制度。

中华人民共和国成立初期，电力网覆盖面积不大，供电企业的供电地域都由国家计划安排。20 世纪 80 年代后，改革开放促使国民经济快速发展，多家办电、多种经济成分使中国的电力工业形成了投资主体、经营主体和利益主体的多元化格局，电网覆盖面日益扩大，交叉供电、重复建设、网中套网，争夺供电营业区的矛盾日益突出。因此，1995 年颁布的《中华人民共和国电力法》规定了实行供电营业区许可制度。随后，1996 年国务院颁布了《电力供应与使用条例》，对供电营业区的划分、设立、变更做了原则规定，并授权国务院电力管理部门制定供电营业区划分和管理的具体办法。同年，电力工业部以第 5 号令颁发了《供电营业区划分及管理办法》。从此，中国的供电营业区纳入了法制化管理的轨道。2011 年，国家电力监管委员会颁布了《供电监管办法》，对供电营业区执行国家有关电力行政许可规定的情况实施监管。

营业许可制度　《中华人民共和国电力法》规定的供电营业许可制度的要点包括：①供电企业在批准的供电营业区向用户供电，对本营业区内的用户有按照国家规定供电的义务，不得违反国家规定对其营业区内申请用电的单位和个人拒绝供电；②一个供电营业区内只设一个供电营业机构；③供电企业必须经过许可，取得供电营业许可证，才能从事供电营业；④供电营业区的划分，应当考虑电网的结构和供电合理性等因素，避免重复建设，交叉供电；⑤供电营业区的设立和变更，应经过申请、审查批准、核发供电营业许可证，并领取营业执照。

营业区划分　鉴于中国国土面积大，为便于分级管理，在《供电营业区划分及管理办法》中规定中国供电营业区分为跨省（自治区、直辖市）行政区划、省（自治区、直辖市）内跨地（市）行政区划、地（自治州、省辖市）内跨县行政区划、县（市）内跨乡镇行政区划共四类。根据电网结构和行政区划不同，一般可将跨省营业区分划为省、地、县三级营业区，省级营业区分划为地、县两级营业区，地级营业区分划为若干个县级营业区，并在下一层营业区内设立相应的供电营业分支机构。办法中对供电企业申请供电营业区的条件、核准程序及营业区的管理做出具体规定。这四类供电营业区，除跨省供电营业区由国务院电力管理部门核准外，其他三类都由省级电力管理部门核准，经核准后发给供电营业许可证。

gongdian yingyeting

供电营业厅　(power supply business station)　供电企业为用户办理用电业务而设置的场所，也称供电营业网点，是供电服务的重要渠道之一。供电营业厅网点（见图）应覆盖供电企业的整体供电区域，其网点分布及功能设置应综合考虑供电区域面积，客户数量、类型及电力消费习惯等因素。供电营业厅应设有规范的企业标志和营业时间；应通过张贴宣传材料、电子屏幕、放置宣传单等方式向消费者公示供电服务项目、业务办理程序、电价表、收费项目、收费标准及用电知识等信息。



中国南方电网有限责任公司供电营业厅

供电营业厅可根据城市、郊区和乡镇的供电服务需要设置厅内的功能区域。除必须具备收付电费功能外，还可按功能分为业务代办区、业务办理区、收费区、展示区、洽谈区、引导区和客户自助区。有条件的地区可配置流动营业厅（车），通过网络技术实现供电服务功能。

gongdian zhiliang

供电质量 （quality of power supply） 供应电能的能力和品质。供电质量包括电能质量和供电可靠性两个方面。电能质量是供应到用户受电端的电能品质的优劣程度，可用电压质量和频率质量来衡量。供电可靠性是持续向用户供电的能力，可用供电可靠率、用户平均停电时间、用户平均停电次数、用户平均故障停电次数等来衡量。供电质量对国民经济和人民生活有很大影响。供电质量不合格，会引起用电设备的性能恶化（如设备的效率和功率因数降低、电能损耗增加、使用寿命缩短），自动远动装置及电子设备工作失常，生产机械生产效率下降、产品质量变劣。供电质量严重不合格时，会使产品大量报废，甚至危及设备与人身的安全。随着科学技术的发展和社会对电的依赖程度的增加，供电质量已经成为衡量一个国家经济发达程度的标准之一，它反映了电力供应对国民经济电能需求的满足程度，并已普遍为世界各国所关注。

电能质量 反映导致供用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率偏差的程度。电力系统中存在大量的非线性负荷、不对称负荷及快速变化的冲击负荷，都不可避免地使电能波形发生畸变，使电网受到严重干扰，造成电能质量不断劣化。

分类 电能质量通常以频率，电压，波形和三相电压、电流的不平衡度等指标来衡量。电能质量问题可分为稳态电能质量问题和暂态电能质量问题两大类。①稳态电能质量问题由长时扰动而引起，影响的范围广且程度深。通常以波形畸变为特征，主要有供电电压偏差、公用电网谐波、三相电压不平衡、电压波动和闪变、电力系统频率偏差等。②暂态电能质量问题因瞬时和短时扰动而引起，是电网遭受外来干扰侵袭及内部故障、操作所带来的系统冲击问题，发生的频率较为偶然，其扰动的随机性大、持续时间短、影响的范围较小但后果严重，通常以频谱和暂态持续时间为特征，主要有电压暂降、电压暂升、电压短时中断、瞬态过电压（见暂态过电压、瞬态过电压）等。与不良电能质量有关的几个重要的波形畸变曲线示意图见图1。

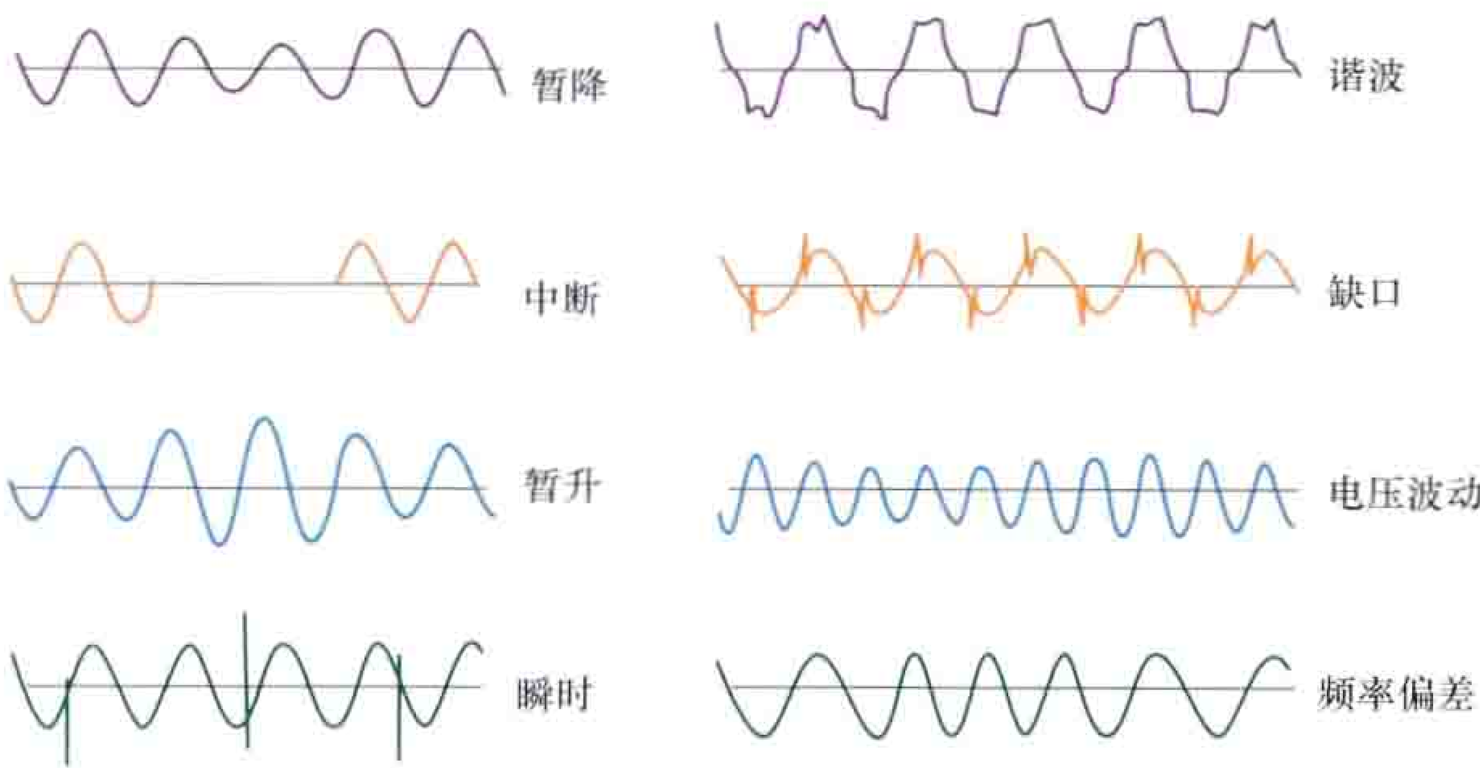


图1 电能质量波形畸变示意图

特点 电能质量的特点包括：①动态性。电能质量始终处于动态变化之中，在空间和时间上呈动态变化且变化形态具有多样性，随着电网结构和负荷改变而不断变化。②相关性。电能的生产、输送、分配和转换过程直至消耗是同时进行的，电能质量一旦不达标，相关的发电、供电、输电、配电、用电设备就会受到不同程度的影响。③传播性。电能的传输速度快，电能质量问题随电能的快速传输使得电气污染波及面大，造成整体电力系统及用电终端的电能质量下降。④潜在性。电能质量扰动复杂多变，事故诱发条件复杂，电能质量的下降对供用电设备的损害有时并不立即显现，对供用电安全运行留下了隐患。⑤复杂性。不同的供/用电点和不同的供/用电时刻，其电能质量指标也不同，一般情况下可以用电能质量标准作为判断依据，但还有许多情况下的电能质量状况没有或者不能用标准来判断。电能质量的多个指标作用于同一个系统时，很难给出电能质量的综合评判标准。国内外大多都取95%概率值作为定量评估的依据。⑥整体性。电能质量不完全取决于供电企业，有些质量指标（如谐波、电压波动和闪变、三相电压不平衡等）往往由用户的负荷决定，还会因发生不可预测事件（如外力、雷击等）而受到影响。保证电能质量需要电力供应方、电力使用方、设备制造商等共同努力，按照国家标准实行控制和管理。

影响 电能质量已渗透到各行各业多个领域，对国民经济和人民生活有广泛的影响。不同质量指标的偏离度，对不同设备有不同的影响。2003年，美国电力研究院（EPRI）的调查结果显示，全美总计停电及电能质量损失为1200亿～1900亿美元；2008年，欧盟电能质量经济影响评估报告指出，劣质电能质量造成的经济损失高达1517亿欧元。中国关于电能质量造成的经济损失及影响调查尚未全面进行，2005年国际铜业协会（中国）抽样调查了32个行业中的49个企业，因电能质量问题的经济损失为2.5亿～3.5亿元（人民币）。因电能质量问题造成的损害包括：①有功功率损耗和电能消费的增加；②缩短电气设备的使用寿命；③无功功率消耗增加，供电功率因数降低；④加大供电系统设备容量，增大系统投资；⑤造成用电设备损害，产品质量降低、数量减少；⑥降低劳动生产力以致破坏生产工艺过程。

标准 从20世纪六七十年代开始，世界各国几乎都制定了有关供电频率和电压允许偏差的计划指标，部分国家还制定了限制谐波、电流畸变、电压波动等的推荐导则。许多发达国家已经制定、颁布、实施了电能质量系列标准，并逐渐与国际专业委员会的推荐标准接轨。国际电工技术委员会（IEC）、美国电气电子工程师协会（IEEE）和欧盟电能质量相关标准见表1～表3。欧盟公用低压和中压配电网中信号频率的电压水平见图2。中国从20世纪80年代开始，将制定电能质量标准列为重点项目，同时引进IEC及其他国际上较为先进的标准，已经颁布的有电能质量指

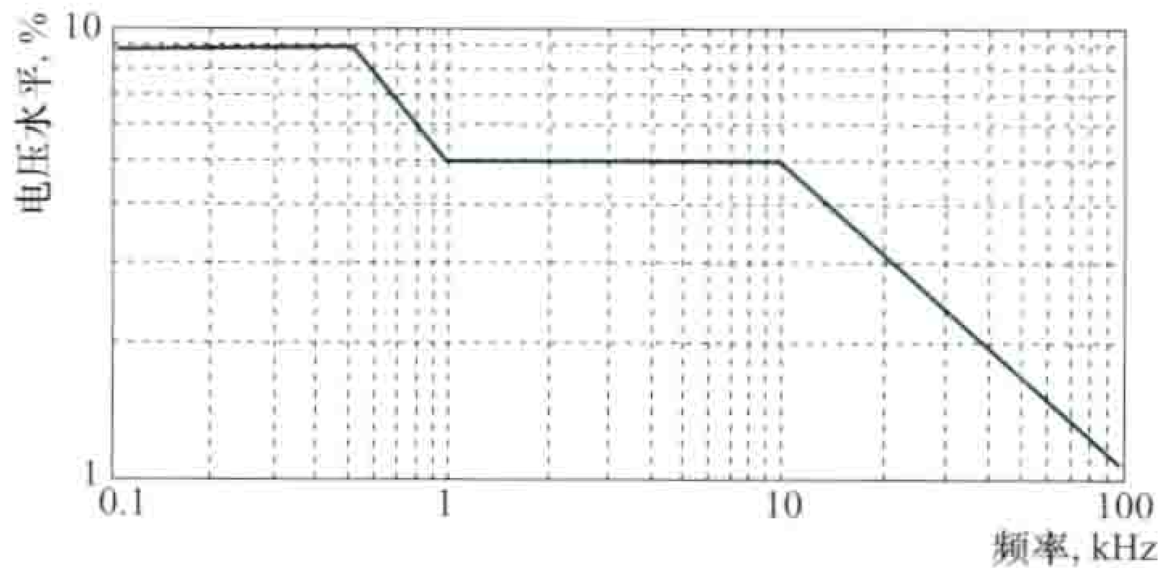


图2 公用低压和中压配电网中信号频率的电压水平

标标准、电磁兼容标准（与电能质量相关的）、电能质量测量及试验标准、电气设备标准、电能质量治理装置标准等共23项国家标准和14项行业标准，见表4和表5。

供电可靠性 直接体现供电系统对用户的供电能力，即用户能以多大的可靠程度得到电力系统供给的电能。它是衡量供电服务质量优劣的重要指标之一。

供电可靠性以供电可靠率 K_c 来衡量。供电可靠率用某一统计期内，实际供电时间之和与本期全部时间比值的百分数表示，即

$$K_c = \frac{T_y}{T_s} \times 100\%$$

$$T_y = T_s - T_t$$

$$T_t = \sum_{i=1}^{n} t_i$$

式中 T_y 为统计期内实际供电时间之和，h；T_s 为统计期的全部时间，h；T_t 为统计期内停电时间之和，h；t_i 为统计期内每次停电的时间，h。停电时间包括计划检修停电时间、事故停电时间、临时停电时间。

表1 IEC中关于公用低压、中压供电系统低频传导骚扰及信号传输的兼容水平

标准版本号	IEC 61000-2-2：2002，IEC 61000-2-12：2003	标准版本号	IEC 61000-2-2：2002，IEC 61000-2-12：2003
名称（英文）	Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low (mid) -voltage power supply systems	电压暂降和短时中断	此是随机事件，电压暂降的影响随着暂降深度和持续时间而增加，故为二维骚扰现象。大多数电压暂降持续时间为0.5周期至1s；由架空线馈电的农村地区每年暂降次数可达几百次，而由电缆网供电的为10～100次。短时中断往往先由电压暂降发生而致
适用范围	规定了公用低压（中压）供电系统（标称频率为50Hz或60Hz）中频率范围为0～9kHz（电源信号系统频率特别规定为148.5kHz及以下）传导性骚扰电磁兼容水平，标准中的兼容水平适用公共连接点	电压不平衡	负序分量为正序分量的2%；在某些地方，特别是有大的单相负荷连接处，可达3%
骚扰现象	低压系统（≤1kV），中压系统（>1kV，≤35kV）	瞬态过电压	就幅值和能量含有而论，考虑到瞬态过电压不同的来源（主要是雷电和操作冲击波），未规定兼容水平
电压波动和闪变	正常情况下电压波动不大于标称供电电压的3%；短期闪变（10min）$P_{st}=1$，长期闪变（2h）$P_{lt}=0.8$	短时工频变化	短时频率变化为±1Hz；稳态的频率偏差要小得多（注：某些设备对频率变化率很敏感）
电压谐波	3次谐波5%；5次谐波6%；7次谐波5%；11次谐波3.5%；13次谐波3%；总谐波畸变8%。对于很短效应（3s以内），总谐波畸变 $THD=11\%$	直流（DC）分量	公用供电系统的电压一般直流分量很小，但当连接某些不对称控制的负荷，以及诸如地磁暴这类不可控事件发生时，DC分量会明显增大。DC电压取决于DC电流及网络阻抗。尚未规定DC电压的兼容水平
电压间谐波	本标准中给出的兼容水平仅对于工频（50Hz或60Hz）附近使供电电压幅值调制，导致闪变的现象而言	电网的信号传输	纹波控制系统（110～3000Hz）注入的正弦波信号值为标称电压的2%～5%；有的国家用Meister曲线作为限值；否则不应超过谐波（奇次、非3倍数次）的兼容水平

表2 美国电磁兼容和电能质量标准（1990年以后）

序号	IEEE标准编号	标 准 名 称	序号	IEEE标准编号	标 准 名 称
1	IEEE std 399—1990	工业和商用电力系统分析推荐导则	11	IEEE std C57.110—1998	供非线性负荷电流时，确定变压器容量的推荐规程
2	IEEE std c62.42—1991	低压交流电力回路中浪涌电压推荐导则	12	IEEE std 1031—2000	输电用静止无功补偿器的功能规范
3	IEEE std 519—2005	电力系统中谐波控制推荐规程要求	13	IEEE std 1459—2000	在正弦、非正弦、平衡或不平衡条件下电能质量测量的定义
4	IEEE std 1100—1992	对于电力和接地敏感的电子设备推荐规程	14**	P519.1/D8b，2003	电力系统中应用谐波限制的导则
5	IEEE std 1303—1994	静止无功补偿器现场试验导则	15	IEEE std 1159.3—2003	电能质量数据交换格式推荐导则
6	IEEE std 446—1995	对于工业和商用紧急和备用电源系统的推荐规程	16	IEEE std 1547—2003	分布式电源和电力系统互联标准
7	IEEE std 1159—2009	电能质量监测推荐规程	17	IEEE std 1585—2002	用于中压（1～35kV）电压波动补偿的电子串联装置功能规范导则
8	IEEE std 1250—2002	对电压瞬时扰动敏感设备的服务导则	18	IEEE std 1531—2003	谐波过滤器的应用和规范指南
9*	P519A/D5，1996	电力系统中应用谐波限制的导则	19	IEEE std 1534—2009	晶闸管控制的串联电容器推荐规范
10	IEEE std 1346—1998	电力系统与电子加工设备兼容性评价的推荐规程	20	IEEE std 1036—2010	并联电力电容器的应用指南

* 序号3标准的补充细则。

** 序号9标准的修订版。

表 3　欧盟公用配电网供电电压的特性

标准版本号	EN50160：2007		
名称（英文）	Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks		
适用范围	正常运行状态下公用中压配电网（>1kV，≤35kV）、低压配电网（≤1kV）在用户供电端的电压主要特性		
主要规定：包括电力系统频率、电压幅值（偏差、波动、过电压、电压暂降）、电压波形（谐波、电压不平衡度以及电网的信号电压）等限值	项　目	低　压	中　压
	供电电压偏差	每周的95%时间内10min平均有效值为±10%U_n，任何10min平均有效值在+10%/−15%U_n	
	电力系统频率偏差	一年99.5%时间内10s平均为±1%（即49.5～50.5Hz）；100%时间为−6%/+4%（即47～52Hz）	
	电压谐波	每周的95%时间内，10min平均有效值：3次谐波5%；11次谐波3.5%；5次谐波6%；13次谐波3%；7次谐波5%；总谐波畸变8%	
	电压不平衡度	每周的95%时间内10min平均有效值小于2%，在个别地方可达到3%	
	电压波动、闪变	正常情况下电压波动一般不大于5%，在某些情况下短时不大于10%；任一周95%时间内，长期闪变P_{lt}小于1	正常情况下电压波动不大于4%，在某些情况下短时不大于6%；长期闪变P_{lt}小于1
	电压暂降	正常情况下预期暂降次数每年为几十次至一千次，持续时间小于1s，暂降幅度要小于60%，有些地区由于用户设施的开关操作，遭电压暂降幅度10%～15%非常频繁	
	短时中断	正常情况下，每年出现几十到几百次，约70%持续时间不超过1s	
	长时中断	正常情况下，每年持续时间超过3min的长时中断只能有10～50次	
	相对地暂时工频过电压	一般小于1.5kV（有效值），持续时间不超过5s	直接接地或经阻抗接地，不超过1.7U_n；不接地或谐振接地的不超过2.0U_n
	相对地瞬态过电压	一般情况下，不超过6kV（峰值）	
	电网的信号电压	一天99%以上时间，3s平均信号电压不超过图2中给定的值	

表 4　中国电能质量国家标准

序号	标准号	标　准　名　称	分类	备　注
1	GB/T 12325—2008	电能质量　供电电压允许偏差	电能质量指标标准	
2	GB/T 12326—2008	电能质量　电压波动和闪变		
3	GB/T 14549—1993	电能质量　公用电网谐波		
4	GB/T 15543—2008	电能质量　三相电压不平衡		
5	GB/T 15945—2008	电能质量　电力系统频率允许偏差		
6	GB/T 18481—2001	电能质量　暂时过电压和瞬态过电压		
7	GB/T 24337—2009	电能质量　公用电网间谐波		
8	GB/Z 18039.1—2000	电磁兼容　环境　电磁环境的分类	电磁兼容标准	
9	GB/Z 18039.2—2000	电磁兼容　环境　工业设备电源低频传导骚扰发射水平的评估		等同 IEC 61000-2-6
10	GB/Z 17625.4—2000	电磁兼容　限值　中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估		等同 IEC 61000-3-6
11	GB/Z 17625.5—2000	电磁兼容　限值　中、高压电力系统中波动负荷发射限值的评估		等同 IEC 61000-3-7
12	GB/T 17626.7—2008	电磁兼容　试验和测量技术　供电系统及所连设备的谐波、谐间波的测量和测量仪器导则	电能质量测量、试验标准	等同 IEC 61000-4-7
13	GB/T 17626.11—1998	电磁兼容　试验和测量技术　电压暂降、短时终端和电压变化抗扰度试验		等同 IEC 61000-4-11
14	GB/T 19862—2005	电能质量监测设备　通用要求		
15	GB/T 20995—2007	输配电系统的电力电子技术　静止无功补偿装置用晶闸管阀的试验		等同 IEC 61954—2003

续表

序号	标准号	标 准 名 称	分类	备 注
16	GB 17625.1—2012	电磁兼容 限值 谐波电流发射限值（设备每相输入电流≤16A）	电气设备标准	等同 IEC 61000-2-2
17	GB/Z 17625.6—2003	电磁兼容 限值 对额定电流大于16A的设备在低压供电系统中产生的谐波电流的限制		等同 IEC TR 61000-3-4
18	GB 17625.2—2007	电磁兼容 限值 对每相额定电流≤16A且无条件接入的设备在公用低压供电系统中产生的电压变化、电压波动和闪烁的限制	电气设备标准	等同 IEC 61000-3-3
19	GB/Z 17625.3—2000	电磁兼容 限值 对额定电流大于16A的设备在低压供电系统中产生的电压波动和闪烁的限制		等同 IEC 61000-3-5
20	GB/T 10236—2006	半导体变流器与供电系统的兼容及干扰防护导则		
21	GB/T 20297—2006	静止无功功率补偿装置（SVC）现场试验	电能质量治理装置标准	
22	GB/T 20298—2006	静止无功功率补偿装置（SVC）功能特性		
23	GB/T 26868—2011	高压滤波装置设计与应用导则		

表5 国家标准中有关电能质量的规定

<table>
<tr><th>标准编号</th><th>标准名称</th><th>允 许 限 值</th><th>说 明</th></tr>
<tr><td>GB/T 12325—2008</td><td>电能质量 供电电压允许偏差</td><td>（1）35kV及以上为正负偏差绝对值之和不超过10%；
（2）20kV及以下三相供电为±7%；
（3）220V单相供电为+7%，−10%</td><td>（1）监测点分为A、B、C、D四类，各监测点每年应随供电网络变化进行调整；
（2）提供电压合格率的计算公式和统计方法</td></tr>
<tr><td>GB 12326—2008</td><td>电能质量 电压波动和闪变</td><td>任何一个波动负荷用户在电力系统公共连接点产生的电压变动 d，其限值和电压变动频度 r、电压等级有关。电压波动限值见下表。
电压波动限值
<table>
<tr><td rowspan="2">r（次/h）</td><td colspan="2">d（%）</td></tr>
<tr><td>LV、MV</td><td>HV</td></tr>
<tr><td>$r\leqslant 1$</td><td>4</td><td>3</td></tr>
<tr><td>$1<r\leqslant 10$</td><td>3</td><td>2.5</td></tr>
<tr><td>$10<r\leqslant 100$</td><td>2</td><td>1.5</td></tr>
<tr><td>$100<r\leqslant 1000$</td><td>1.25</td><td>1</td></tr>
<tr><td colspan="3">公共连接点的长时间闪变限值 P_{lt}</td></tr>
<tr><td>≤110kV</td><td colspan="2">>110kV</td></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="2">0.8</td></tr>
</table>
注：系统标称电压 U_N 等级按以下划分：低压（LV），$U_N\leqslant$ 1kV；中压（MV），1kV $<U_N\leqslant$ 35kV；高压（HV），35kV $<U_N\leqslant$ 220kV。
单个波动用户在PCC点引起的闪变值按三级作不同的规定和处理</td><td>（1）监测点为公共连接点（PCC）；
（2）规定了限值分三级处理原则；
（3）P_{lt} 的测量时间为2h，不得超标；
（4）提供预测计算方法，规定测量仪器并给出典型分析实例</td></tr>
<tr><td>GB/T 14549—1993</td><td>电能质量 公用电网谐波</td><td>各级电网谐波电压限值（%）
<table>
<tr><td>电压（kV）</td><td>THD</td><td>奇次</td><td>偶次</td></tr>
<tr><td>0.38</td><td>5</td><td>4.0</td><td>2.0</td></tr>
<tr><td>6、10</td><td>4</td><td>3.2</td><td>1.6</td></tr>
<tr><td>35、66</td><td>3</td><td>2.4</td><td>1.2</td></tr>
<tr><td>110</td><td>2</td><td>1.6</td><td>0.8</td></tr>
</table>
注：1. 220kV电网参照110kV执行。
2. 表中 THD 为总谐波畸变率</td><td>（1）监测点为PCC，取实测95%概率值；
（2）对用户允许产生的谐波电流提供计算方法；
（3）对测量方法和测量仪器做出规定；
（4）对同次谐波随机性合成提供算法</td></tr>
</table>

续表

<table>
<tr><th>标准编号</th><th>标准名称</th><th>允 许 限 值</th><th>说 明</th></tr>
<tr><td>GB/T 15543—2008</td><td>电能质量 三相电压不平衡</td><td>（1）正常允许2%，短时不超过4%；
（2）每个用户一般不得超过1.3%</td><td>（1）各级电压要求一样；
（2）衡量点为PCC，取实测95%概率值或日累计超标不许超过72min，且每30min中超标不许超过5min；
（3）对测量方法和测量仪器做出基本规定；
（4）提供不平衡度算法</td></tr>
<tr><td>GB/T 15945—2008</td><td>电能质量 电力系统频率允许偏差</td><td>（1）正常允许±0.2Hz，根据系统容量（界限为3000MW）可以放宽到±0.5Hz；
（2）用户冲击引起的频率变动一般不得超过±0.2Hz</td><td>对测量仪器提出了基本要求</td></tr>
<tr><td>GB/T 18481—2001</td><td>电能质量 暂时过电压和瞬态过电压</td><td>（1）系统工频过电压限值见下表。
系统工频过电压限值
<table>
<tr><th>电压等级（kV）</th><th>过电压限值（标幺值）</th></tr>
<tr><td>U_m>252（Ⅰ）</td><td>1.3</td></tr>
<tr><td>U_m>252（Ⅱ）</td><td>1.4</td></tr>
<tr><td>110及220</td><td>1.3</td></tr>
<tr><td>35～66</td><td>$\sqrt{3}$</td></tr>
<tr><td>3～10</td><td>$1.1\sqrt{3}$</td></tr>
</table>
注：1. U_m 指工频峰值电压。
2. Ⅰ和Ⅱ分别指线路断路器两侧的线路电压。
（2）操作过电压限值。包括空载线路合闸、单相重合闸、成功的三相重合闸、非对称故障分闸及振荡解列过电压限值，见下表。
操作过电压限值
<table>
<tr><th>电压等级（kV）</th><th>过电压限值（标幺值）</th></tr>
<tr><td>500</td><td>2.0*</td></tr>
<tr><td>330</td><td>2.2*</td></tr>
<tr><td>3～220</td><td>3.0</td></tr>
</table>
* 该过电压相对地统计操作过电压</td><td>（1）暂时过电压包括工频过电压和谐振过电压，瞬态过电压包括操作过电压和雷击过电压；
（2）工频过电压1.0（标幺值）$=U_m/\sqrt{3}$。谐波过电压和操作过电压1.0（标幺值）$=\sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$；
（3）除统计过电压（不小于该值的概率为0.02）外，凡未说明的操作过电压限值均为最大操作过电压（不小于该值的概率为0.0014）；
（4）瞬态过电压还对空载线路分闸过电压、断路器开断并联补偿装置及变压器等过电压限值做出了规定</td></tr>
<tr><td>GB/T 24337—2009</td><td>电能质量 公用电网间谐波</td><td>间谐波电压含有率限值（%）
<table>
<tr><th rowspan="2">电压等级</th><th colspan="2">频率（Hz）</th></tr>
<tr><th><100</th><th>100～800</th></tr>
<tr><td>1000V及以下</td><td>0.2</td><td>0.5</td></tr>
<tr><td>1000V以上</td><td>0.16</td><td>0.4</td></tr>
</table>
单一用户间谐波电压含有率限值（%）
<table>
<tr><th rowspan="2">电压等级</th><th colspan="2">频率（Hz）</th></tr>
<tr><th><100</th><th>100～800</th></tr>
<tr><td>1000V及以下</td><td>0.16</td><td>0.4</td></tr>
<tr><td>1000V以上</td><td>0.13</td><td>0.32</td></tr>
</table></td><td>（1）监测点为PCC；
（2）基于离散傅里叶分析（DFT）算法规范间谐波的测量，但不排除更先进的间谐波测量方法；
（3）间谐波的测量频率分辨率为5Hz，测量采样窗口宽度为10个工频周期；
（4）提供间谐波测量仪器准确度等级</td></tr>
</table>

gongdian zhongduan

供电中断 （interruption of power supply） 见停电。

gongyongdian hetong

供用电合同 （contract of power supply） 供电人（供电企业）向用电人（用户）供电，用电人（用户）向供电人（供电企业）支付电费的协议。供用电合同是根据用户用电的需要和电网的可供能力，在遵守国家的法律法规，符合国家供用电政策的基础上，在供电前，供电企业与用户以书面形式签订的明确供用电双方权利和义务关系的协议，也是双方需共同遵守行为准则的重要法律文书。供用电合同依法订立后，当事人必须按合同约定全面履行自己承担的义务，不得擅自变更或解除合同，不履行或不能完全履行合同

时，应承担相应的违约责任。依法签订供用电合同有利于维护正常的供用电秩序，保护双方的合法权益。在某些情况下，允许依法变更或解除供用电合同。

中国20世纪50年代前称供用电合同为用电契约。1981年国家颁发《中华人民共和国经济合同法》，将供用电合同列为十类基本合同之一。1999年3月15日，九届全国人大二次会议审议通过的《中华人民共和国合同法》，将供用电合同列为十五类基本合同之一，并于1999年10月1日起施行。

特征　供用电合同的标的是电能。电能的使用具有广泛性、随意性和不能储存等特点，因此，供用电合同是具有明显特征的一种特殊经济合同。

（1）合同规制的特殊性。电能既是商品也是人们生产、生活的必需品。一方面，由于电能的生产、供应与使用需同时进行，致使供用电合同标的物的交付与标的物的使用也需同时进行。另一方面，由于电力供应的垄断性，且供用电合同的履行地点是供电用设施的产权分界处（见产权分界点），因此，法律不得不对其予以特殊规制。

（2）合同履行的持续性。因电能的供应与使用具有连续性，因而供用电合同的履行方式表现为一种持续状态，履行合同双方当事人的权利义务比较稳定，是一种具有相对长期、稳定的合同。

（3）合同形式属于格式合同。一般供用电合同的条款由供电方预先拟定，用电方可以提出自己的意见，但不能决定合同的相关内容，只能决定是否同意订立合同。这类具有格式条款的合同称为格式合同，或制式合同。

（4）合同主体的特殊性。主要是对供电方有特定要求。在中国，供电方需是经国家法定程序认定具有供电营业资格的供电企业，否则无权作为供用电合同的供电方与用户签订供用电合同。用电方的范围则十分广泛，包括国家机关、企事业单位、各类社团法人、个体工商户、农村承包经营户及广大城乡居民等，无特定要求。

（5）合同双务诺成的特殊性。供用电合同的双务性是供用电当事人双方都享有权利和承担义务的合同，供电方承担供电义务，用电方承担支付电费义务。尽管供电方在供用电合同中处于主导地位，但合同一经订立，就必须按照国家规定和合同约定来供应电力，不得滥用自己手中的职权或垄断权。供用电合同的诺成性体现在供用电双方就合同条款内容达成一致意见时，合同即成立生效，而不是以电力的实际供应时间为合同生效的要件。

（6）合同违约责任的特殊性。由于电力供应与使用具有行政管理内容，且涉及电网安全、稳定、经济运行等因素，供用电合同的违约责任与其他民事合同相比有其特殊性。①有免除责任。供电设施大都架设在野外露天，随时有遭受人为或自然环境侵害的可能，发生意外事故（包括不可抗力、外力破坏、第三者责任等）的概率较高且很难预见，所以对不属于供用电双方当事人过错而造成合同不履行或不能完全履行的，国家法律予以了免除责任规制。②有连带责任。电能质量和供用电安全是受国家规制的对象，供用电双方都有责任和义务遵守国家和电力行业的技术标准（规范）和安全规定。这种连带责任的现象，在其他经济合同中是少见的。③不以实际损失赔偿。供用电当事人中任何一方或双方因违约或责任事故引起的直接或间接的经济损失，涉及面广，数额巨大，且发生损害事实的举证或认定往往十分困难。若按实际损失赔偿，供用电双方当事人都无力承担，因此，世界各国对违反供用电合同所引起的经济责任，都采用按实际损失电量及相应的电价倍数的方法进行赔偿，而不是按实际经济损失进行赔偿。这样做的好处：一是避免供用电双方因惧怕赔不起而不愿签订合同；二是避免发生损害举证上的困难与纠纷；三是简化损失计算方法，统一赔偿标准。

类型　供用电合同一般根据管理的需要和供用电的实际情况进行分类。按用户所用电压等级不同，分为高压供用电合同和低压供用电合同；按供用电时间的长短，分为长期供用电合同和临时供用电合同；按用户负荷性质的重要程度，分为高危及重要用户供用电合同和一般用户供用电合同；按用户属性，分为居民供用电合同和非居民供用电合同等。在中国，通常按照供电方式、用电需求并考虑管理的需要，分为高压供用电合同、低压供用电合同、临时供用电合同、趸购电合同、委托转供电合同、居民供用电合同，并根据需要，同时还有电力调度协议、电费结算协议、并网协议等必要的补充协议，与合同具有同等效力。供用电合同一般采用书面的标准格式合同，如遇供用电设施管理关系复杂，或供电方式特殊，或者电价需合同特别约定的，则采用书面非标准格式合同。居民用户一般采用背书合同形式。

高压供用电合同适用于供电电压为10kV（含6kV）及以上的大型电力用户，包括高危及重要用户、双（多）电源供电用户、有自备电源用户等。

低压供用电合同适用于供电电压为220/380V的普通电力用户。这类用户的用电负荷特性、用电量明显小于高压供电用户，但用户数量远远比高压用户多。

临时供用电合同适用于短时、非永久性用电的用户，如基建工地、农田水利、市政建设、抢险救灾（见图）等。



抢险救灾现场（2012年7月21～22日凌晨，北京市电力公司全力应对北京61年来最强降雨）（洪雷　摄）

趸购电合同适用于向供电企业趸购电力再转售给用户的情况。这种类型的供用电管理关系比较复杂，国家对其有特定的规制要求。

委托转供电合同适用于公用供电设施未到达地区，供电方委托有供电能力的用户（转供电方）向第三方（被转供电方）供电的情况。这类用户数量不多，但供用电矛盾和纠纷多，需逐步进行改制和规范。

居民供用电合同适用于居民用户。居民用户供用电关系简单，但用户数量巨大。为便于管理，一般以用电申请登记表或电费通知单等背书形式确立供用电合同关系。

电力调度协议是供用电双方为了电网安全、合理运行及调度指令畅通而签订的协议。双方在协议中需确认调度管理、运行方式管理、继电保护管理、通信管理等电容。

电费结算协议是供用电双方为明确电能计量及贸易结算方面的关系及责任而签订的协议。双方在协议中需确认：计量点、计费计量装置、计费容量或用电最大需量、用电功率因数、电价、抄表及电费计算方式和方法、电费支付方式、电费交付期限及电费违约责任等。

并网协议是供用电双方为明确发电厂并入电网运行而发生的供电关系及责任签订的协议。用户的自备发电厂、独立的小水电站、小火电厂以及其他独立发电厂，为向电网卖电或为保证发电厂的运行安全，拟并入电网运行的，双方在协议中需确认并网方式、电能质量和发电时间、并网发电容量、年发电利用小时和年上网电量、计量方式和上网电价、电费结算方式、电网提供的备用容量及计费标准、并网操作、调度通信及事故处理、解网条件及违约责任等。

基本内容　《中华人民共和国合同法》和《电力供应与使用条例》规定了供用电合同的必备条款。内容包括供电方式、供电质量和供电时间，用电容量、用电地址和用电性质，计量方式、电价、电费及结算方式，供用电设施的维护责任，合同的有效期限，违约责任以及双方共同认为应当约定的其他条款。

（1）供电方式、供电质量和供电时间。供电方式是供电企业向申请用电的用户提供的电源特性、类型及其管理方式的统称。包括供电频率、电压、电源地址、电源数量、供电回路、供电接线方式、运行方式等。通常情况下，供电方式的确定以供电的电压等级和电源数量最为重要。供电质量以供电频率质量、电压质量和供电可靠性衡量，应该符合国家规定的标准。供电时间是合同履行期限及履行具体时间的约定。

（2）用电容量、用电地址和用电性质。统称为用电方式。用电容量是用户申请用电的报装容量，包括受电变压器及直供高压电动机容量和台数总和。用电地址是用户用电场所的地理位置及用电地点。用电性质则包括电力用途、用电负荷重要程度、用电班次及时间、用电功率因数、保安用电设备及保安负荷等。

（3）计量方式、电价、电费及结算方式。计量方式包括计量点、计量装置及其安装位置。一般应按用电类别分别进行计量。电价需明确用电计价依据、计价方式、计价类别和计价标准。电费包括计费容量或最大需量计算、售电量计算、变压器损耗及线路损耗电量计算、容量（需量）电费及电量电费计算、用电功率因数及功率因数调整电费计算等。结算方式则明确电费支付方式、电费交付期限等。高压供电用户的电价、电费结算方式比较复杂，一般都需签订《电费结算协议》作为合同附件。

（4）供用电设施的维护责任。按每一供电回路明确供用电设施维护的主体、内容、界限和各自应当承担的责任。包括产权分界点、电气分界点、运行维护管理等。

（5）合同的有效期限。确定是长期合同还是短期合同，以及合同效力的发生和终止时间。

（6）违约责任。合同当事人违约之后所应承担的法律责任，包括免除责任条款、承担责任条款、损失计算、赔偿方式等。

（7）其他未尽事宜的规定。合同中未明确的事项，包括调度通信、供用电安全要求、停送电联系、电费结算协议、并网协议、委托转供电协议等约定及争议的解决方式等。

日本的供用电合同　一般按不同的电力用途进行分类，有包灯、表灯、临时表灯、公用路灯、非生产用电力、高压电力、低压电力、特别高压电力、临时电力、农业用电力、备用电力、深夜电力等10多个种类。

日本各电力公司都有自己制订并经过通商产业大臣批准的《供电规程》。在《供电规程》中，对供用电合同的订立、变更、解除、终止、违约责任、合同期限等都有明确规定。标准合同就是依据《供电规程》制作，并受其约束的标准格式合同。标准合同的主要内容有：合同类别、供电方式、受电地点、用电地点、供电电压、合同容量（或电流与电力），产业种别、电力用途、用电起始日期、用电期限、电费付款方式等。标准合同自电力公司认定之日起生效。用户申请用电时，首先要承认《供电规程》，在此基础上，根据用户用电容量、用电性质和供电条件等，确定其适合的标准合同的类别。日本供用电合同类别见表。

日本供用电合同类别

用电区分	合同类别		用电区分	合同类别	
电灯用灯	包灯		电力用电	低压电力	
	表灯	甲		高压电力	甲
		乙			乙
		丙		特别高压电力	
	临时表灯	甲		临时电力	
		乙		农业用电力	
		丙		备用电力	甲
	公用路灯	甲			乙
		乙			丙
灯力并用	非生产用电力			深夜电力	甲
					乙

当出现不能按《供电规程》制定合同的情况时，根据《日本电气事业法》规定，取得通商产业大臣的认可，可以与用户签订特约合同。如用电时间特约合同、负荷调整特约合同、定时调整特约合同、工业用电夏季停运特约合同、业务用电特约合同等。

法国的供用电合同　采用统一的标准格式合同。根据供电电压的不同，将供用电合同分为第一类合同与第二类合同两种。第一类合同适用于高中压供电的用户，第二类合同适用于低压供电的用户。用户在申请用电、办理用电业务时，法国电力公司根据其供电电压的高低，与用户签订相适应的供用电合同。

第一类供用电合同的条文分为通用部分和特殊部分。通用部分条文适用所有高中压供电的用户，特殊部分条文适用于对供电有特殊要求的用户。通用部分条文内容包括合同事由、受电装置及其接线、供电可靠性、计量方式、合同负荷、电价、电费保证金、捐税付款、违约责任、合同有效期等。

第二类供用电合同的条文比较简单，有申请事由、用户名称与地址、用电报装容量、电价种类、电费与付款方式、双方应承担的责任等。

见营业管理。

gongyongdian jiandu guanli

供用电监督管理 (supervision of power supply and utilization) 对电力供应与使用行为实施的行政监管活动。供电企业和用户在供用电活动中都不得损害国家和社会的利益，不得损害对方或他人的合法权益。国际上通行的管理办法是以法律、法规的形式对供用电双方的权利和义务加以约束，并由国家经济综合部门或其指定的专门机构，依法执行行政监督，以保证法律、法规的实施。

在中国，1952年引进苏联的用电监察制度并结合中国当时计划经济体制下的经济管理特点，建立了用电监察制度，1963年制定了《用电监察条例（草案）》。1995年12月28日，颁布了《中华人民共和国电力法》，随着《电力供应与使用条例》等配套法规的实施，电力部门实行政企分开，逐步具备了依法监督的条件。根据《中华人民共和国电力法》第五十六条规定和《电力供应与使用条例》第三十六条授权，电力工业部按政企分开的原则，分别制定了《供用电监督管理办法》和《用电检查管理办法》。《供用电监督管理办法》与《用电监察条例（草案）》的基本区别是：在执行主体和对象上，将政企不分的电力部门对用户单方面的监督管理，改为由电力行政主管部门对电力企业和用户双方进行监督管理。保留并强化了行政监督管理职能，剔除了属于电力企业行为的内容。2005年2月2日国务院颁布了《电力监管条例》，由国家电力监管机构履行对电力市场的监管职责，包括发电企业、电力调度交易机构、供电企业等。（见用电检查）

《供用电监督管理办法》中规定了供用电监督管理的职责、监督检查人员的资格考核程序、电力违法行为的查处程序及处罚规定等内容。

监督管理职责　包括：①宣传、普及电力法律和行政法规知识；②监督电力法律、行政法规和电力技术标准的执行；③监督国家有关电力供应与使用政策、方针的执行；④负责月用电计划审核和批准；⑤协调处理供用电纠纷，依法保护电力投资者、供应者与使用者的合法权益；⑥负责进网作业电工和承装（修、试）单位资格审查，并核发许可证；⑦协助司法机关查处电力供应与使用中发生的治安、刑事案件；⑧依法查处电力违法行为，并做出行政处罚。

监督检查人员资格考核程序　个人提出书面申请，经申请人所在单位同意，县以上电力管理部门推荐，接受专门知识和技能培训，参加全国统一组织的考试，合格后发给供用电监督资格证。省级电力管理部门负责本行政区域内的供用电监督管理人员的资格申请、审查和专门知识及技能的培训；国务院电力管理部门负责全国统一考试，并对合格者颁发供用电监督资格证。

电力违法行为查处程序　各级电力管理部门负责本行政区域内发生的电力违法行为查处工作。上级电力管理部门认为必要时，可直接查处下级电力管理部门管辖的电力违法行为，也可将自己查处的电力违法事件交由下级电力管理部门查处。对电力违法行为情节复杂，需由上一级电力管理部门查处更为适宜时，下级电力管理部门可报请上一级电力管理部门查处。

电力管理部门对受理的电力违法事件，视其性质和危及电网安全运行的紧迫程度，可依法在现场查处，也可立案处理。案件调查结束后，应视案情做出处理，案件处理完毕后，承办人应及时填写《电力违法案件结案》，经主管领导批准后结案。案情重大或上级交办的案件结束后，应向上级电力管理部门备案。

gutai kaiguan

固态开关 (solid state switch) 一种全部或部分采用电力电子器件关合与开断电流的电力负荷开关或断路器。分为电子型和混合型两种。电子型固态开关一般由开关本体、检测电路、控制驱动电路和缓冲电路构成，大功率固态开关还需有强力风冷系统。开关本体以晶闸管反并联作为一个交流开关模块，再通过串联和并联的不同构成形式，适应不同的额定电压和电流。晶闸管根据开关的容量、速度和可控性要求选择，通常大容量、高电压固态开关采用大功率的晶闸管（SCR）、门极可关断晶闸管（GTO）或者新型的发射极可关断晶闸管（ETO）器件，绝缘栅双极晶体管（IGBT）则多用于容量不大的低压开关。混合型固态开关则由超快速机械开关和固态开关并联而成，正常通流由机械开关承担，满足大容量和低损耗要求；故障开断由固态开关完成，实现快速、可控时刻和无电弧的开断和关合性能。

与传统机械开关相比，固态开关的优点有：①开关速度快，可达到微秒级；②可准确控制关合时刻，能限制故障电流；③无触头机构和灭弧室，减少故障率；④寿命长。

固态开关的不足之处：①单个电力电子器件耐压和通流能力不高，需采用串联和并联方式构成高压固态开关和大容量固态开关，其均压和均流措施较复杂；②正常工作时损耗大，需散热或冷却措施。

固态开关常作为超快速负荷开关、转换开关和限流断路器以满足敏感负荷的供电质量，也是静止无功补偿装置等的重要部件，它可以对配电系统参数和网络结构快速灵活控制，是实现柔性配电系统的关键设备。

电子型固态开关　分为固态转换开关（solid state transfer switch，SSTS）与固态断路器（solid state circuit breaker，SSCB）两种。利用电力电子器件导通与截止速度快的特点，解决传统机械开关动作时间长（达数个周波）带来的问题。

固态转换开关是由晶闸管（SCR）或门极可关断晶闸管（GTO）构成的负荷开关，可在接到控制命令后数十微秒内接（导）通，在半个周波内关断（截止）。如果用绝缘栅双极晶体管（IGBT）代替晶闸管，其关断时间可缩短至数微秒以内。固定转换开关用于双电源供电回路的切换，可避免采用机械开关倒闸操作引起的较长时间供电中断，使敏感负荷的供电不受影响。如图1所示，双电源供电回路正常运行时，固态转换开关A接通、开关B关断，敏感负荷由电源A供电，电源B处于备用状态。当控制系统检测到电源A停电时，在半个周波内将开关A关断，开关B接通，负荷在一个周波内转为电源B供电，实现供电回路的“无缝”转换。

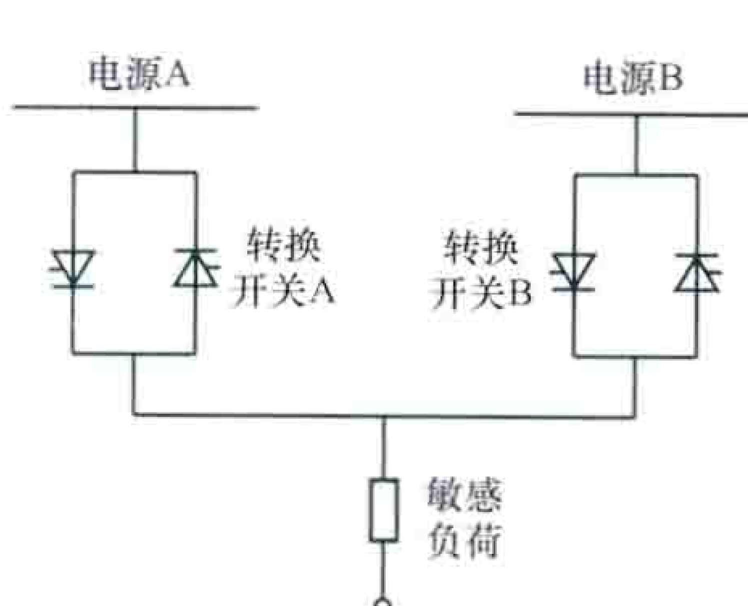


图1　应用固态转换开关的双电源供电回路

固态断路器由门极可关断晶闸管（GTO）回路和晶闸管（SCR）加限流电抗器（或电阻器）回路两部分并联而成，如图2所示。正常运行时，电流流经GTO支路。电力系统故障时，流经GTO支路的电流迅速超过限额，GTO在半个周波之内关断，故障电流流经SCR和限流电抗器支路，达到限制故障电流的目的，然后SCR关断，完全切断故障电流。

混合型固态断路器（hybrid circuit breaker）　由快速机械开关和固态开关并联构成，通过多种电路拓扑结构实现，集机械断路器过载能力和固态开关动态特性的优势为一体，具有综合优势。混合型固态断路器分为自然换流式和强制换流式两种。自然换流式的机械主开关与固态开关同时通断，利用主开关触头间电弧电压的反电动势将电流切换到固态开关，再由固态开关最后关断电流。由于使用超快速机械开关，混合型固态断路器的分合可以在10ms之内完成，并具有机械开关的载流和开断能力。受限于开断时电弧电压必须大于固态开关导通电压的条件，多用于中、低压系统，且固态开关的器件要选用导通压降较小的器件。强制换流式使用超快速机械开关，采用电感电容串并联谐振电路，利用谐振电流抵消主开关的电流，在主开关上创造一个人工电流过零点，在这个过零瞬间打开主开关，实现无弧断开，并可以实现在1ms之内开断，多用于高、中压配电系统。

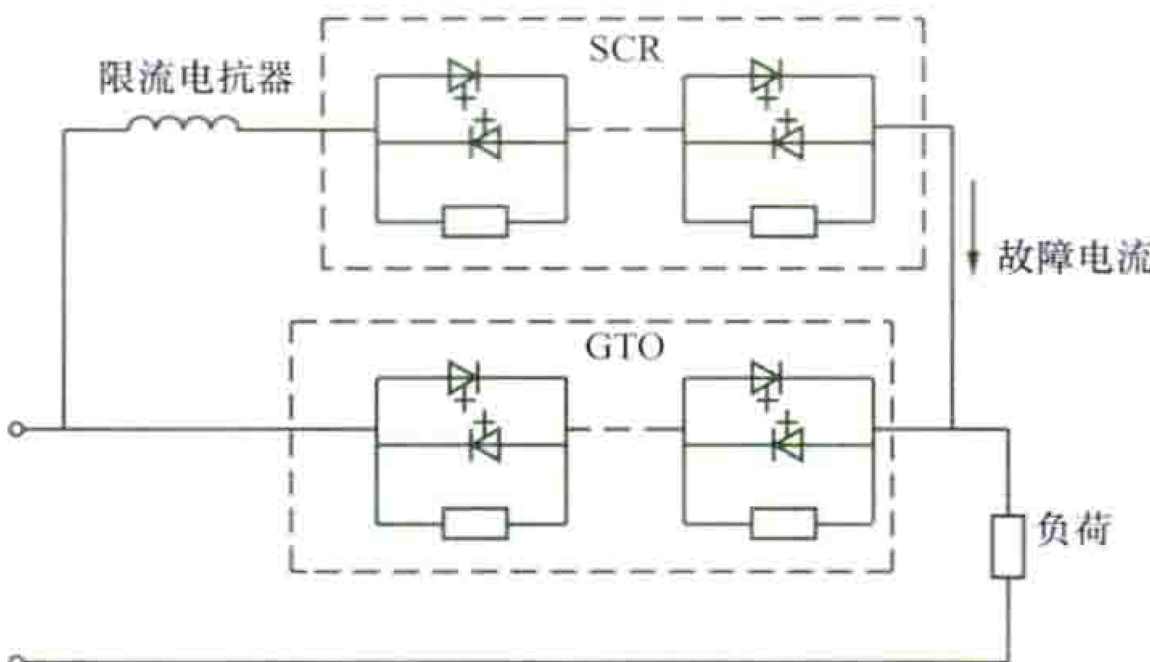


图2　固态断路器构成原理图

发展概况　自20世纪70年代出现晶闸管固态断路器以来，随着电力电子器件和测控技术的发展，全电子型的SCR/IGBT/GTO型固态开关以及机电混合型固态开关相继研制成功并投入使用，并向高电压、大电流、超快速、高可靠性和易维护方向发展。1993年初容量为6.6MW、平均工作电流为800A的反并联门极可关断晶闸管固态断路器在美国4.6kV交流馈电线路上投入使用，其短路故障开断时间小于300μs；2003年发射极可关断晶闸管（ETO）在美国研制成功，基于ETO的关断速度快、关断大电流的能力强、通态损耗低、结构简单的固态断路器正迅速发展。在工程应用上，低压固态开关在发达国家已大量使用，在中国也已投入商业应用；而中、高压固态开关已经在静止无功补偿装置、限流断路器等方面投入应用，并向应用于敏感用户的快速切换开关发展，将逐步成为柔性配电系统的关键部件。

参考书目

徐德鸿．现代电力电子器件原理与应用技术．北京：机械工业出版社，2008.

guzhang zhishiqi

故障指示器　（fault passage indicator）　安装在配电线路分段开关或分支线处，能够检测故障电流并根据需要指示其流向的自动化装置。传统的故障指示器仅有用于当地指示故障检测结果的标示牌或闪光灯，在线路发生故障后，巡线人员通过人工观察故障指示器的动作情况，判断故障所在的线路区段。随着带有远传功能的故障指示器的应用，配电网自动化系统主站可以根据故障指示器的动作信息，自动定位故障区段。故障指示器能够加快故障查找速度，具有构成简单、投资小、安装方便的优点。图1和图2所示为架空型故障指示器，图3所示为电缆型故障指示器。


图1　架空型故障指示器

主要功能　包括故障检测、故障指示与通信远传三方面。故障检测包括短路故障检测和小电流接地故障检测。故障指示采用翻牌和（或）发光方式指示故障。通信远传功能是将故障检测结果通过通信通道（如采用无线公网GPRS）上传至配电自动化系统主站。

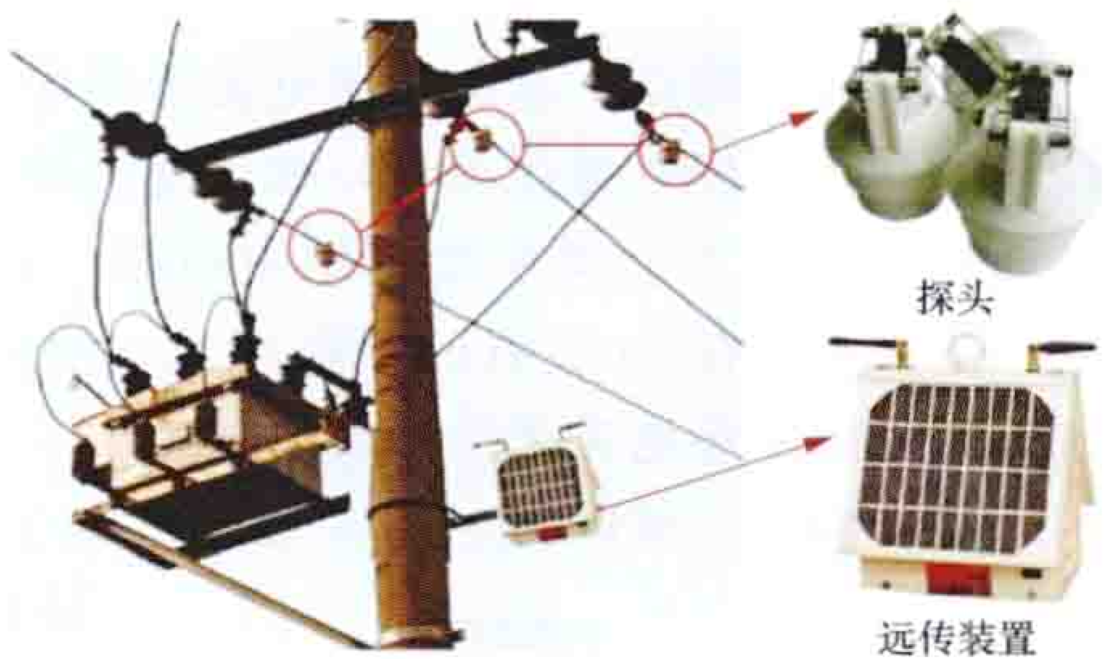


图2　带远传功能的架空型故障指示器外形与安装情况


图3　电缆型故障指示器

短路故障检测　检测电流、电压信号在故障前后以及断路器动作前后的变化，判断是否出现了短路故障。一般是通过检测电流在故障前后的突变量（变化量）ΔI来判断故障，为了能够检测高阻相间短路故障与有效接地系统的单相接地短路故障，电流突变量的整定值一般选择为200～500A。为了避免由于配电变压器的合闸励磁涌流和电动机负荷的冷起动电流形成的电流突变引起故障指示器误动作，引入电流突变量的持续时间作为辅助判据，根据实际短路故障历时情况，一般整定在60ms～3s之间。为进一步提高故障检测的可靠性，在具备电压检测条件时，可引入电压判据。对于短路故障来说，在断路器保护动作切除故障后，线路电压消失；而在线路出现励磁涌流、冷起动电流时，线路会继续带电维持运行。因此，可把电流突变量消失时电压是否同时消失也作为故障判断条件，电压消失的整定值选为额定电压的20%左右。故障指示器的短路故障判据可表示为

$$\begin{cases}\Delta I > I_s \\ U < U_s \\ T_{1s} < \Delta t < T_{2s}\end{cases}$$

式中 I_s 为电流突变量整定值；U_s 为电压消失整定值；T_{1s} 为电流突变量持续时间下限整定值；T_{2s} 为电流突变量持续时间上限整定值。

为提高动作的可靠性，有的故障指示器还引入过电流判据。过电流的整定值一般选为 1.5～2 倍的额定电流值。

小电流接地故障检测　非有效接地系统（见中压配电网中性点接地方式）的单相接地故障检测。现有的故障指示器主要采用暂态零序电流方向、零序电流扰动两种小电流接地故障检测方法。①暂态零序电流方向法，根据故障时零序电压与零序电流之间的初始极性关系检测接地故障。对中性点非有效接地系统故障暂态特征的分析得知（见非有效接地系统单相接地故障选线）：零序电流从故障点两侧流向故障点。故障点上游故障指示器检测到零序电流与零序电压的初始极性相反，而故障点下游的零序电流与零序电压之间的初始极性相同。②零序电流扰动法，在出现接地故障后，人为地在配电网的中性点上周期性投切中电阻，产生幅值在数十安培、变化周期在 1s 左右的零序电流，故障指示器通过检测这种变化的零序电流来检测接地故障。

基本构成　故障指示器一般由电流/电压信号探头、故障检测电路、输出电路、复归控制电路和电源电路几部分构成，如图 4 所示。

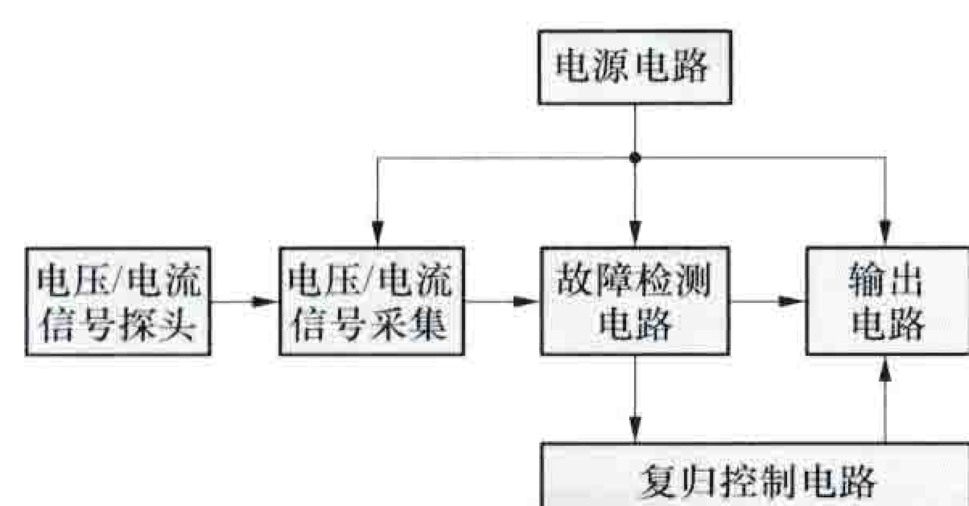


图 4　故障指示器基本构成

电流/电压信号探头　有接触式与非接触式两种。接触式电流探头的构成与工作原理类似于常规的电流互感器，一般是卡接在架空线路、电缆或开关柜母排上，卡环同时起到铁芯的作用；非接触式电流探头是一个带铁芯的线圈，安装在柱上架空线路的下方，通过测量线路下方的磁场信号，间接测量线路电流。接触式电压探头是电压传感器；非接触式电压探头是由两个极板构成的电场传感器，安装在柱上架空线路的下方，通过测量线路下方的电场信号，间接测量线路电压。

故障检测电路　采集并处理电流/电压信号，判断是否出现了故障电流。有些情况下，要求能够检测故障方向。

输出电路　包括当地显示输出与远传输出。当地显示输出用于指示有故障电流出现，有些情况下，还要能够指示故障方向。显示方式主要有旋转翻牌与发光二极管两种。远传输出接口通过通信通道向配电网自动化系统主站报告故障指示结果，有开关量触点输出与串行通信接口两种形式。

复归控制电路　用于复归故障指示器指示状态，为下一次故障指示做准备。故障指示器动作后，其指示状态一般在维持数小时至十几个小时后自动复归；在按设定的时限复归前，如果故障排除、恢复送电，则提前自动复归。

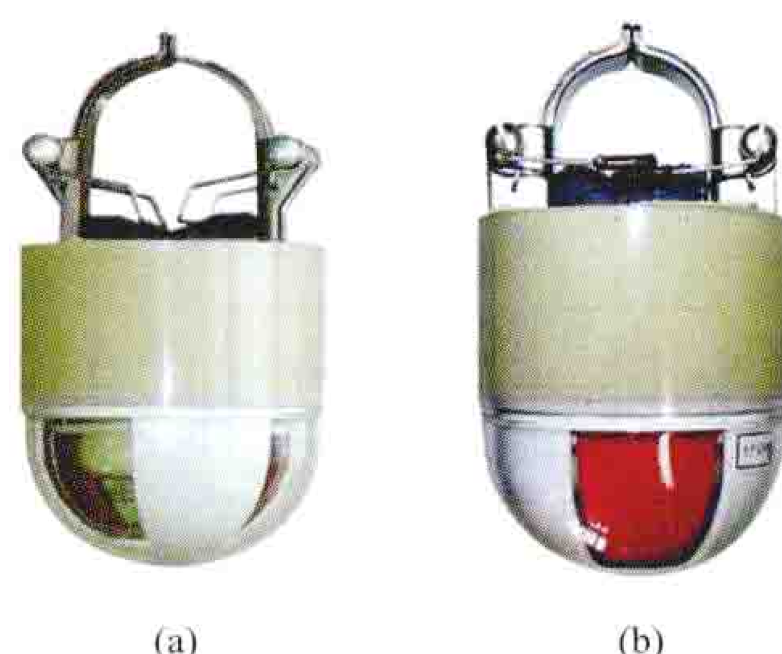
电源电路　为故障指示器提供电源，包括：①利用配电线路电流给电源回路充电。一般通过从电流探头二次输出取电。有的故障指示器是在电流探头上装设专用取电线圈。②锂电池供电。③锂电池与电流探头充电结合应用。由于线路电流变化比较大，利用电流取电难以保证电源的可靠性；而锂电池容量有限，供电时间不会太长。将两者结合，在线路电流比较大时，由电流探头输出供电；当电流比较小或空载时，锂电池自动投入。这样既能保证电源的可靠性，又可延长供电时间。④光伏电池供电。

分类　分为架空配电线路故障指示器和配电电缆线路故障指示器两大类。中国还开发出能够监视电缆线路运行电流与开关位置的“二遥”故障指示器。

架空配电线路故障指示器　包括悬挂式和非接触式两类。

悬挂式故障指示器穿接在架空配电线路导体上，其顶端带有自动卡线机构，使用专用绝缘工具带电安装。悬挂式故障指示器采用接触式电流探头，内置非接触式电压传感器，只能测量单相电流，仅用于检测、指示短路故障。

典型悬挂式故障指示器如图 5 所示，采用旋转翻盘方式指示故障。正常运行时，其红色圆形显示体藏匿在遮挡体下，对外显示为白色；在检测到故障时，显示体旋转出来，对外显示呈红色。在需要与配电网自动化系统主站远传通信时，需要增加专用的远传装置。远传装置通常采用太阳能电池供电，如图 6 所示。远传装置安装在配电电杆上，与故障指示器进行无线通信。在检测到短路故障后发信给远传装置；远传装置汇集故障指示器发来的信号，并将其通过无线等通信方式转发到配电网自动化系统主站。



(a)　　(b)

图 5　典型悬挂式故障指示器
(a) 正常运行状态；(b) 故障指示器状态



图 6　远传装置外形与安装情况

非接触式故障指示器安装在配电电杆上，使用非接触式探头测量电流、电压信号。能够检测短路故障与小电流接地故障，就地用不同颜色指示故障和（或）方向，带远传输出触点。

配电电缆线路故障指示器　包括短路故障指示器、接地故障指示器、三相综合故障指示器等多种类型。①短路故障指示器卡接在电缆线芯上，其构成及原理与架空配电线路悬挂式故障指示器类似。②接地故障指示器的构成与短路故障指示器类似，但其探头的尺寸比较大，可以卡接在整个电缆导体上，能够检测接地故障产生的零序电流。③三相综合故障指示器采集处理来自电流、电压互感器或传感器的电流、电压信号，检测指示短路故障和小电流接地故障，一般设计有通信接口，实现故障信号的远传。

“二遥”故障指示器　除了能实现故障遥信、开关位置遥信外，还能测量并上传运行电流的电缆线路故障指示器。由 3 只短路故障指示探头、一只接地故障指示探头、一台面板指示器和一台采集终端组成，如图 7 所示。故障指示探头

检测运行电流与故障，通过塑料光缆分别与就地显示器和信息采集终端通信。采集终端接收来自故障指示探头的信息并可接入被监视的开关位置信息，通过无线等通信方式将运行电流、故障指示信息和开关位置信息上传到配电网自动化系统主站。

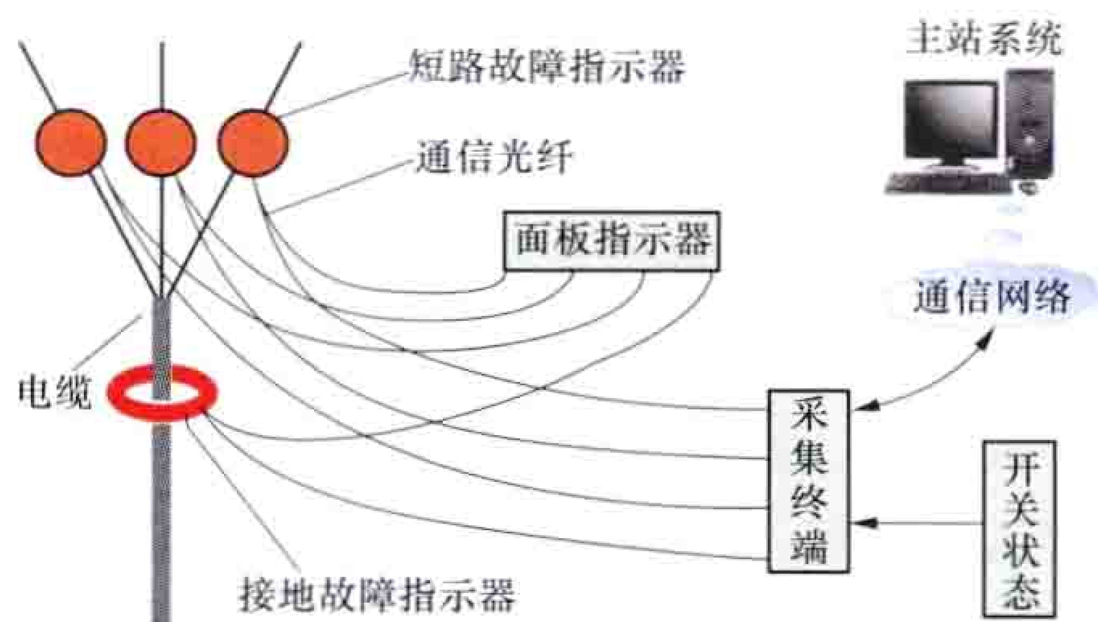


图 7 “二遥”故障指示器的构成

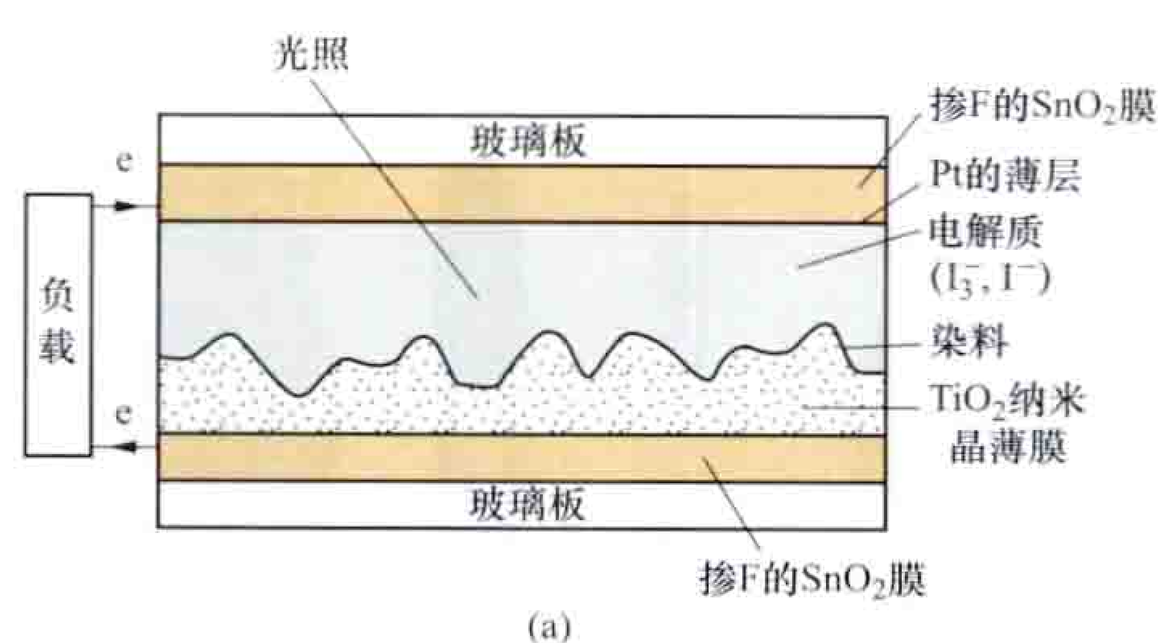
guangdian huaxue dianchi

光电化学电池 (photo electrochemical cell) 用浸于电解质中的光敏半导体电极构成的化学电源，是太阳能电池的一种。光电化学电池的负极为用半导体制成的光照电极，正极为惰性多孔金属电极，正、负极浸在电解质中。当光照在半导体负极上时，半导体吸收大于其能带宽度的光子，产生电子-空穴对，半导体-电解质界面的电场将电子-空穴对分离，电子经外电路流到正极，使氧化性离子还原，空穴扩散到电极和电解液的界面，使还原性离子氧化。于是，电子既在外电路中做功，又在电池中维持着电化学氧化、还原两反应的不断进行。

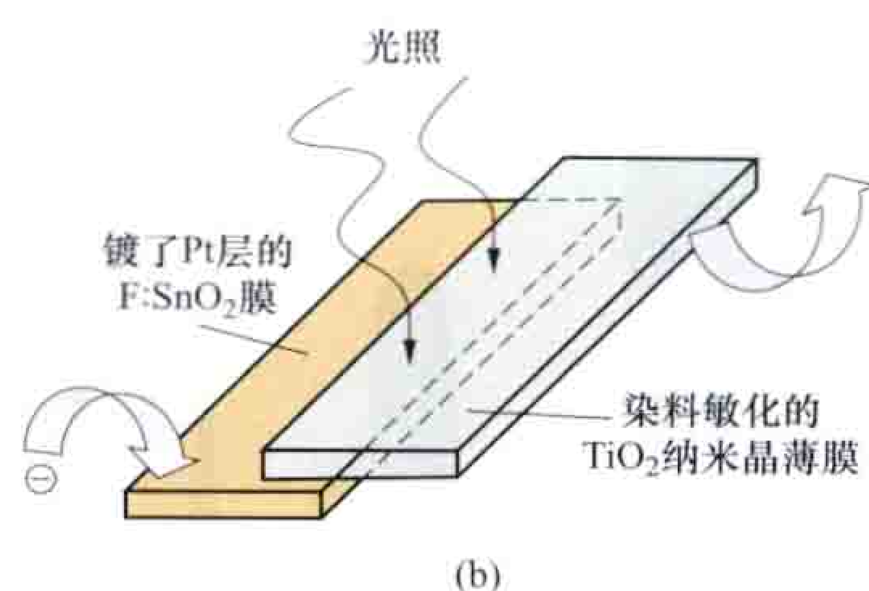
最早出现的光电化学电池，其电解质为溶液，又称液结太阳能电池。由于其负极存在禁带宽度窄的易于被腐蚀，而禁带宽度宽的不能利用大部分可见光能的不足，已被染料敏化太阳能电池取代。染料敏化太阳能电池利用有机染料对半导体的染料敏化作用，将电池体系的光谱响应延伸到可见区。

1991 年，瑞士人格拉兹尔（Grätzel）等人将钌（Ru）的络合物做成的染料吸附在 TiO_2 纳米多孔膜半导体电极上，制备成最早的染料敏化太阳能电池。到 2010 年，染料敏化太阳能电池光电转换效率已达 11.12%，短路电流达 $18mA/cm^2$，开路电压达 720mV，而成本仅为硅太阳能电池的 1/5～1/10。

染料敏化太阳能电池由纳米多孔半导体薄膜、染料敏化剂、氧化还原电解质、对电极和导电基底等几部分组成。如图所示，纳米多孔半导体薄膜主要是 TiO_2，聚集在有透明导电膜的玻璃板（导电基底）上作为染料敏化太阳能电池的负极，其作用是吸附染料敏化剂，并将激发态染料注入的电子传输到导电基底，除了 TiO_2 之外，适用材料还有 ZnO、Nb_2O_5、WO_3、Ta_2O_5、CdS、Fe_2O_3 和 SnO_2 等，其中 ZnO 因来源较丰富、成本低、制备简单等优点，实际也有应用。染料敏化剂常用卟啉和 Os（锇）及 Ru（钌）等多吡啶配合物。通常用导电基底作为对电极，同时在其上镀铂或金，起还原催化剂的作用。最常用的电解质是 I_3^-/I^-，可做成液态、胶态和固态。



(a)



(b)

染料敏化太阳能电池结构
(a) 结构图；(b) 示意图

参考书目

熊绍珍，等. 太阳能电池基础与应用. 北京：科学出版社，2009.

guanghuanjing

光环境 (luminous environment) 由光与颜色建立起来的，用生理和心理效果来评价的视觉环境。光环境对人的精神状态和心理感受会产生影响：对于生产、工作和学习场所，良好的光环境能振奋人的精神，提高工作和学习效率以及产品质量；对于休息、娱乐等公共场所，合宜的光环境能创造舒适、优雅、活泼生动的气氛。创造舒适的光环境，提高视觉效能，是建筑光学的主要研究课题。

光环境设计是室内外环境设计的有机组成部分，需将环境学、建筑学、物理学、美学、生理学、心理学、人类工效学等多种学科的理论与实用知识有机地融合为一体。光环境设计主要包括天然光环境设计与人工光环境设计两部分。天然光环境设计指充分利用天然光视觉功效高、光谱齐全、显色性好、节约能源和费用等优点，为使用者创造一个在生理与心理上均感到舒适满意的光环境；人工光环境设计则是根据被照对象的特征与功能要求，选用相应的人工光源与灯具照射被照对象形成的光环境，其特点是不受天气、时间与地点的影响，具有很强的可控性。优良光环境的营造需要规划师、建筑师、室内设计师、电气照明工程师、设备工程师和用户紧密合作，相互配合才能完成。

影响光环境的因素包括照度或亮度及其分布、光色、视野外的亮度分布、眩光、阴影等。

guangtongliang

光通量 (luminous flux) 根据辐射对标准光度观测者的作用导出的光度量，符号为 Φ。光通量的单位为流明(lm)，1lm 等于由一个具有 1cd（坎德拉）均匀发光强度的点光源在 1sr（球面度）单位立体角内发射的光通量，即 1lm=1cd·1sr，它是一个导出单位。在电气照明中，光通量是标明电光源发光能力的基本量，如一只 40W 的白炽灯的额定光通量为 330lm，一只 40W 的卤粉直管荧光灯的额定光通量为 2760lm，一只 36W 三基色直管荧光灯的额定光通量为 3350lm。

对于明视觉，有

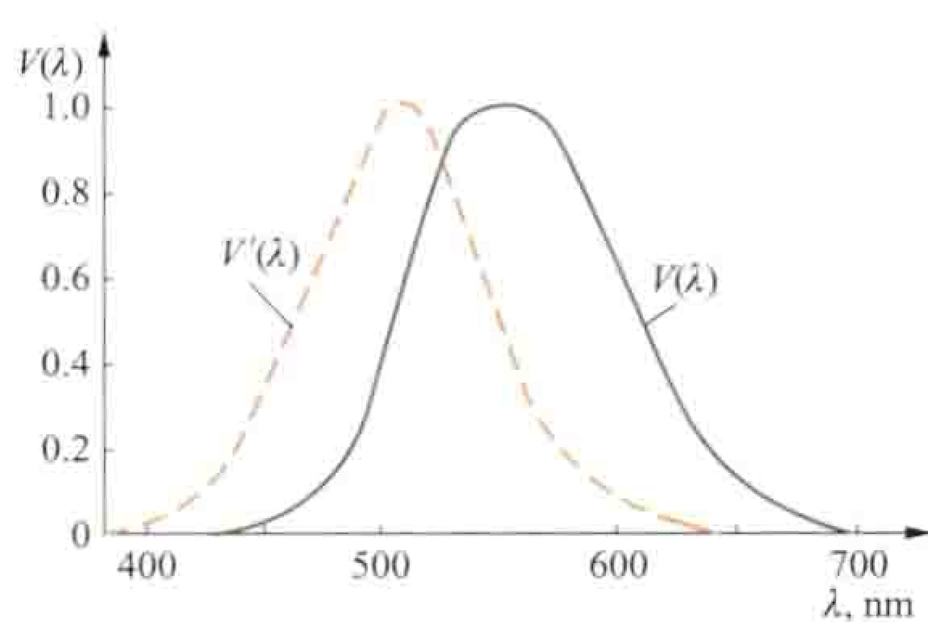
$$\Phi = K_m \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

式中 K_m 为光谱光视效能的最大值，lm/W，在单色辐射时，明视觉条件下的 K_m 值为 683lm/W（λ = 555nm 时）；$d\Phi_e(\lambda)/d\lambda$ 为辐射通量的光谱分布；$V(\lambda)$ 为光谱光视效率函数。

根据各国国家计量实验室测量的平均结果，在明视觉条

件下，K_m 位于频率为 540×10^{12} Hz、波长为$\lambda=555$nm 处。1977 年国际计量委员会采用频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射的最大光谱光视效能 $K_m=683$lm/W。在暗视觉条件下，单色辐射的最大光谱光视效能 K_m 为 1754lm/W，其波长位于 507nm 处。

V（λ）为国际照明委员会（CIE）标准光度观测者在明视觉条件下的光谱光视效率函数，简称视见函数。它是在特定光度条件下，视亮度感觉相等的波长为 λ_m 和 λ 的两个辐射通量之比。λ_m 选在最大比值等于 1 处。在明视觉条件下（适应亮度大于几个坎德拉/米²），$\lambda_m=555$nm，此时 $V(\lambda)=1$。1971 年国际照明委员会（CIE）公布的明视觉 $V(\lambda)$ 的标准值于 1972 年获国际计量委员会批准（见图）。在暗视觉条件下（适应亮度小于 0.01cd/m²）的光谱光视效率函数以符号 $V'(\lambda)$ 表示，其最大值位置向短波方向移动，在 $\lambda'_m=507$nm 时，$V'(\lambda)=1$。图中的 $V'(\lambda)$ 曲线是 CIE 于 1951 年推荐的。



视见函数 V（λ）曲线

实线—明视觉；虚线—暗视觉

guangwuran

光污染 (light pollution)　干扰光或过量的光辐射（含可见光、紫外光和红外光辐射）对人和生态环境造成的负面影响的总称。光污染泛指影响自然环境，对人类正常生活、工作、休息和娱乐带来不利影响，损害人们观察物体的能力，引起人体不舒适感和损害人体健康的各种光，以及城市室外照明使天空发亮造成对天文观测的负面影响。波长 10nm～1mm 的光辐射，在不同的条件下都可能成为光污染源。

光污染的产生及危害　国际上一般将光污染分成白亮污染、人工白昼和彩光污染三类。

白亮污染　正午太阳光照强烈时，建筑物的玻璃幕墙、釉面砖墙、磨光大理石饰面和各种大面积浅色涂料外墙等形成强烈的光线反射某些特殊行业如冶炼、熔烧、焊接等也会产生眩光夺目的白亮光线。这些强光不仅对眼睛形成强烈刺激，还可能产生短暂的视觉失能，从而引发车祸和工伤事故等。长时间在白亮污染环境下工作和生活的人，视网膜和虹膜都会受到不同程度的损害，如视力急剧下降，白内障频发、头昏心烦，甚至出现失眠、食欲下降、情绪低落、身体乏力等类似神经衰弱的症状。因此，长期在强光下工作的人，需要佩戴防护眼镜来降低强光对眼睛的伤害。

人工白昼　夜幕降临后，城市中大量商场、酒店、餐馆和娱乐场所的灯光广告和牌匾闪烁夺目，令人眼花缭乱，部分强光束甚至直冲云霄，使得现代城市的夜晚如同白天一样，即所谓人工白昼。在这样的“不夜城”里，人们难以按时入睡，正常的生物钟受到干扰，导致白天工作效率低下。人工白昼也会影响动植物的生长状态，如强光就可能破坏昆虫在夜间的正常繁殖过程。

大城市普遍、过多地使用灯光，使天空背景亮度增加，影响了天文观测，很多天文台因此被迫停止工作。据天文学统计，在夜晚天空不受光污染的情况下，可以看到的星星约为 7000 颗，而在拥有大量路灯、灯光广告和灯光景观的大城市里，只能看到20～60 颗星星。

彩光污染　舞厅、夜总会安装的黑光灯、旋转灯、荧光灯以及商业广告灯发出的高亮度彩色光线会产生彩光污染。据测定，黑光灯所产生的紫外线强度大大高于太阳光中的紫外线强度，且对人体有害影响持续时间较长。人如果长期接受这种照射，可诱发鼻出血、牙齿脱落、白内障等，甚至导致白血病或其他癌变。彩色光源让人眼花缭乱，不仅对眼睛不利，而且干扰大脑中枢神经，使人感到头晕目眩，甚至出现恶心呕吐、失眠等症状。科学家最新研究表明，彩光污染不仅有损人的生理功能，而且对人的心理也有影响。

光污染的防治　包括：①加强城市规划和管理，改善工厂照明条件等，以减少光污染源。②对有红外线和紫外线污染的场所采取必要的安全防护措施。③采用个人防护措施，主要是戴防护眼镜和防护面罩。④玻璃幕墙等反射材料容易产生白亮污染，使用时要注意其对周围环境的影响。如使用玻璃幕墙时，要选用毛玻璃等材质粗糙的，而不应使用全反光玻璃；要注意玻璃幕墙安装的角度，合理利用吸光材料，避免建筑物的高反射率表面产生光污染。

光对环境的污染是实际存在的，但由于缺少相应的污染标准与立法，因而不能形成较完整的环境质量要求与防范措施，这一点必须给予广泛的关注。

guangxian fuhe dianlan

光纤复合电缆 (optical fiber composite cable)　将光纤与电力电缆的导体、屏蔽层或护层系统组合在一起构成的电缆。在电力电缆传输电力的同时，可利用光纤作通信（电力系统的保护、测量、控制、信号）通道，同时可以作监测电缆施工敷设中的机械应力、电缆运行中的运行温度、电缆的连续性等的传感元件。

分类　光纤复合电缆主要有 3 种复合方式：直接将光纤复合在电力电缆芯间，将光纤嵌入电力电缆屏蔽层或铠装层，将光纤排入电力电缆的导体中。各种光纤复合电缆见图 1。

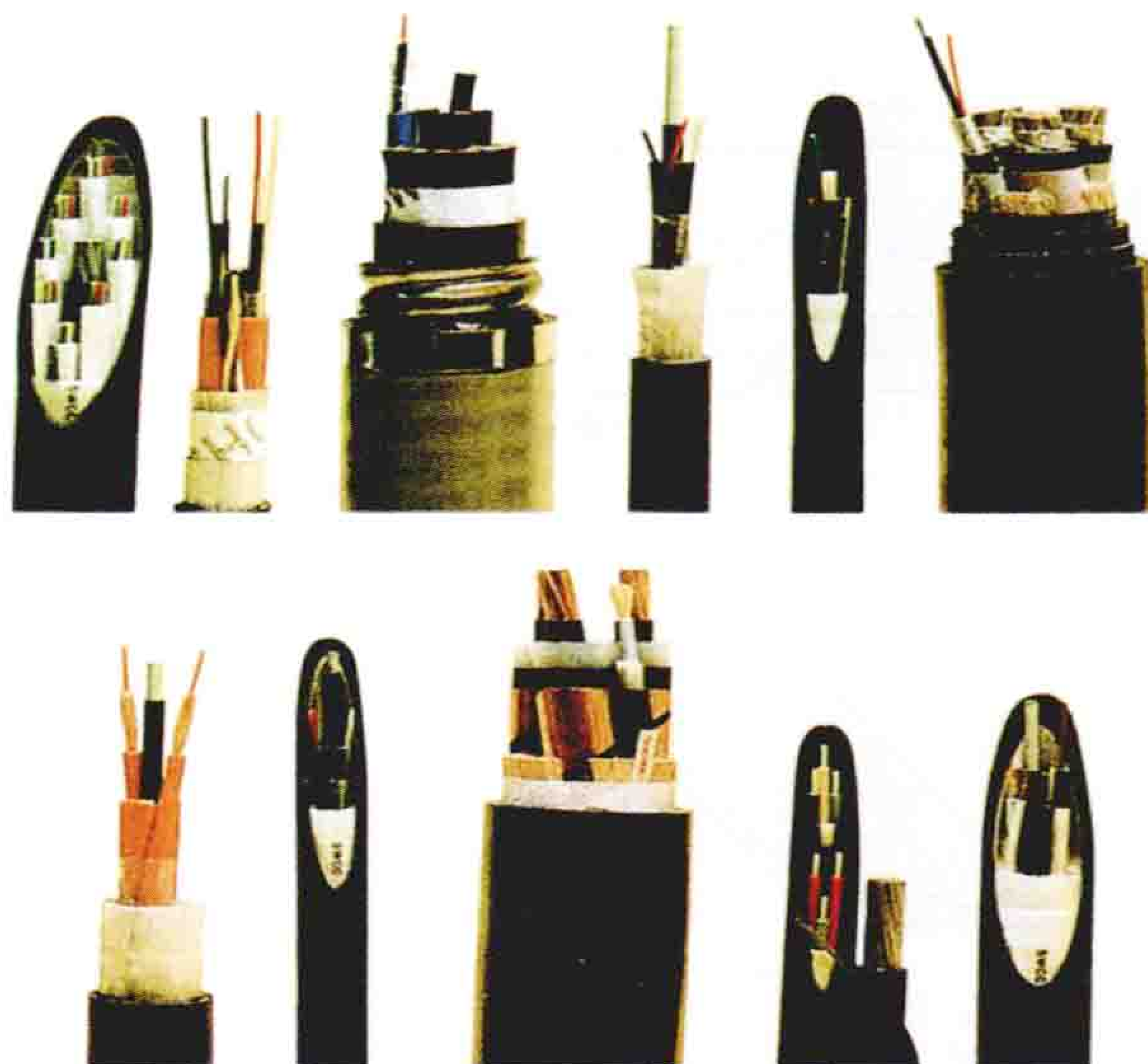


图 1　光纤复合电缆

（1）光纤复合在电力电缆芯间的光纤复合电缆。其光纤与三芯电力电缆一起成缆，光纤的位置在电力电缆芯间的空隙位置。这种结构使光纤在机械上受到很好的保护。

（2）将光纤嵌入电力电缆屏蔽层的复合电缆。有两种结构：一种结构是将光纤排入电力电缆等直径的铜丝屏蔽层，占据一根铜丝的位置，但遇电缆线路短路时，电弧可能将光纤烧损，因此要在铜屏蔽层的不同方位上安排至少两根光纤；另一种是将光纤排于钢丝或铝合金丝铠装层，一根光纤占据一根金属丝的位置。钢丝铠装光纤复合电缆一般作为海底电缆。带光纤的三芯交联聚乙烯海底电缆见图2。

（3）将光纤排入电力电缆的导体中的复合电缆。这种结构能直接记录导体运行温度，光纤也能受到很好的机械保护，缺点是需要额外制作特殊的终端和接头，增加了费用。

发展概况　20世纪70年代开始以光缆进行信息传输和用于动力系统的保护、测量、控制等，并与架空输配电线路配合。90年代初开始研制和开发光纤复合电缆，将光纤与电力电缆复合在一起（见图3）。进入21世纪，随着智能电网和海上风电场的发展，光纤复合低压电缆（见图4）和超高压光纤复合海底电缆产品迅速发展。2009年，随着电力光纤到户关键技术取得重大突破，世界上第一条用于商业运营的光纤复合低压电缆在中国研制成功。2010年8月7日，中国国产首条110kV光电复合海底电缆正式在福建省平潭电网投入运行。



图2　带光纤的三芯交联聚乙烯海底电缆



图3　带光纤的交联聚乙烯电缆

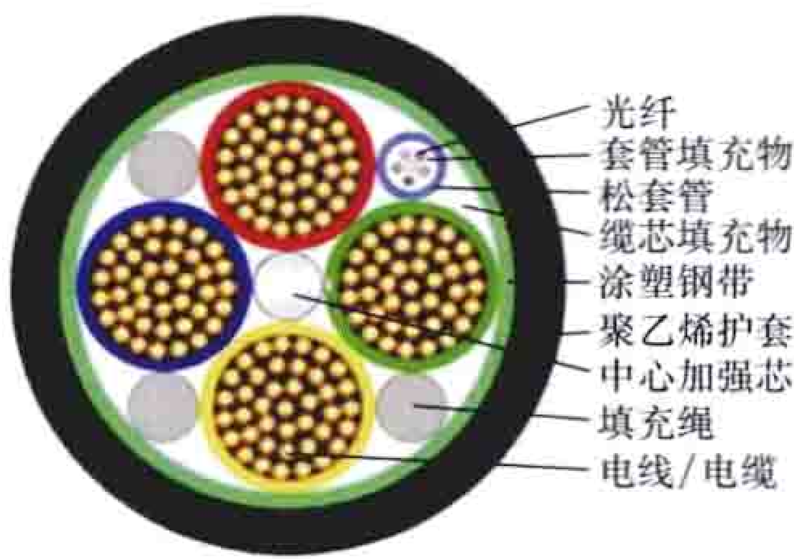


图4　光纤复合低压电缆

guangyuan (qiju) faguang xiaoneng

光源（器具）发光效能　（luminous efficacy）　发光体把受激发时吸收的能量转换为光能的能力。发光效能是反映照明产品是否具备节能效果的重要指标。

发射光谱不同的发光体，即使它们有相同的功率效率（发光体输出的发射功率与输入的激发功率之比），人眼所见的亮度也不同。光源（器具）发光效能所反映的正是这个区别，通常用光通量和输入功率之比表示，单位为lm/W。

发光效能的大小反映发光体内部能量激发、能量传递、复合发光以及无辐射复合过程的总效果，它与发光体的成分、发光中心的种类及浓度、共激活剂的选择、有害杂质的控制以及发光晶体的完整性，甚至与具体的工艺过程有关。

由于光源（器具）的发光性能是随使用时间逐渐下降的，因此在发光效能的评价中要考虑的一个重要因素是光通维持率，即灯在寿命期间内一特定时间的光通量与该灯的初始光通量之比。中国标准中规定荧光灯在燃点2000h时的光通量维持率不得低于80%。

guanggao zhaoming

广告照明　（advertising lighting）　利用灯光照明或显示广告牌体的照明设施和技术。良好的广告照明对传播信息、宣传产品、美化城市、丰富人们的夜生活均具有重要的作用（见图1和图2）。

分类　由于室外广告的形式繁多，如店面广告、广告塔、广告牌或柱、多面翻广告、动态立体广告、空中广告等，以致广告照明的种类与方法也不断增多，归纳起来主要有霓虹灯广告照明、投光（泛光）广告照明、灯箱广告照明、大屏幕显示屏广告照明、光纤广告照明、导光管广告或标志照明、投影广告照明、隐形广告照明、全息图广告照明和空中广告照明等。

霓虹灯广告照明　借助氖、氦、汞、氩或氖氩混合气体的正柱辉光放电而发光的霓虹灯作广告照明。由于霓虹灯技术的不断进步，新品种的霓虹灯不断出现，在一个相当长的时期内，霓虹灯广告照明还会有新的发展。变色霓虹灯、光纤霓虹灯、彩虹光源霓虹灯、无极霓虹灯和低压电子霓虹灯会相继问世，这对霓虹灯广告照明是一个有力的促进。



图1　美国纽约时代广场广告夜景

投光（泛光）广告照明　利用外投光方法照明广告，外投光光源可以是卤钨灯、荧光灯、显色性改进型汞灯和金属卤化物灯等多种照明器。由于照明技术的进步，投光广告照明技术日趋成熟，照明设计更加规范，投光广告照明的照度标准、照明的均匀度逐步标准化。

灯箱广告照明　将电光源安装在透光的箱体内进行广告照明，灯箱有柔性灯箱、铁皮灯箱、胶片灯箱、磨砂玻璃灯



图2　美国拉斯维加斯市拉斯维加斯大道广告夜景

箱、漫透射有机玻璃板灯箱等多种。

大屏幕显示屏广告照明　大屏幕显示屏是利用单个发光器件作单元组合而成的大面积矩阵视频显示系统，这种系统用于广告照明，不仅画面亮度高、对比度大、色彩鲜艳，而且和电视一样可显示动态画面和文字，是20世纪80年代出现的一种广告照明。

由于使用的发光器件的不同，大屏幕显示屏主要有发光二极管显示屏、阴极射线管显示屏、荧光放电管显示屏等。常用显示屏发光器件技术参数见表1。

表1　显示屏发光器件技术参数

参　数	亮度 (cd/m^2)	像素密度 (光点/m^2)	功耗 (kW/m^2)
发光二极管	200～300	9800～19000	2.0～2.3
荧光放电管 (FDT)	1000～5000	200～3000	2.0～3.0
阴极射线管 (CRT)	1300～4000	200～13000	0.5～1.2

这种广告媒体已广泛用于人多的公共场所、交通要道。其功能除广告宣传外，还可发布信息，丰富人们的文化娱乐生活，是观众较喜爱的广告媒体。

光纤广告照明　20世纪80年代以来，世界广告业开始应用光导纤维技术制作广告照明。光导纤维具有传光范围广、质量轻、体积小、用电省、不受电磁场干扰、频带宽等优点。美国纽约时代广场上的可口可乐光纤照明广告，画面图像清晰，色彩鲜艳，图像在电脑控制下变幻无穷，广告效果显著。

导光管广告或标志照明　用导光管将光导入广告或道路标志灯箱内进行照明。这一照明广告画面图像清晰、色彩丰富、检修方便，工作人员不需打开灯箱，在地面即可检修更换光源。

投影广告照明　在夜间将广告影像通过投影仪/机投射到建（构）筑物立面上的一种广告照明，适合于城市非居住建筑。因投影机难以在玻璃上成像，所以玻璃幕墙建筑不适用。另外，建筑立面的窗户对投影成像有影响，应选择开窗面积适合的建筑立面，或安装临时或永久性幕布。一般投影广告机约需1m×2m空间，可在离外墙50～400m内投出100～300m^2的广告图像，使用时应注意防止图像周围眩光的影响。

隐形广告照明　利用隐形幻彩颜料绘制的广告图案，在自然光和常规光源的照射下不能显现其图案，只有用紫外光照射时，才能显现其色彩斑斓、形象逼真的广告画面。

全息图广告照明　利用全息图技术设计制作的广告照明。其特点是图形轮廓清楚，画面三维立体感特别强。

空中广告照明　在气球内安装照明光源作为空中广告照明。这是20世纪末推出的高空气球广告照明。这类照明的电源，一种是利用自备电池，另一种是利用特制电源线将电由地面引至球内，供照明光源使用。

规划　广告的种类和形式很多，广告照明随之也是多种多样的。市政管理部门对室外广告及照明应有统一的规划。针对不同的街道或地区的文化内涵、街道功能、地区环境状况、历史背景等，对广告的形式、内容、大小及位置进行统一规划，使之整齐划一，有条不紊，成为美化城市市容的重要组成部分。

亮度标准　中国对不同环境区域与不同面积的广告与标志照明的亮度均有明确规定，见表2。对外投光广告与标志照明的亮度均匀度（L_{min}/L_{max}）宜为0.6～0.8；广告与标志采用外投光照明时，应控制投射范围，散射到广告与标志外的溢散光不应超过20%。

表2　不同区域与面积的广告与标志照明的平均亮度标准（cd/m^2）

广告与标志照明面积（m^2）	环境区域 E1	E2	E3	E4
$S \leqslant 0.5$	50	400	800	1000
$0.5 < S \leqslant 2$	40	300	600	800
$2 < S \leqslant 10$	30	350	450	600
$S > 10$	—	150	300	400

注：E1—天然暗环境区；E2—低亮度环境区；E3—中等亮度环境区；E4—高亮度环境区。

参考书目

肖辉乾．城市夜景照明技术指南．北京：中国电力出版社，2004.

guibandaoti zhengliuqi

硅半导体整流器　(silicon semi-conductor rectifier)

用硅整流管或/和晶闸管等电力半导体器件组成的，将交流电能变换为直流电能的成套设备。电力半导体器件是整流器的核心器件，可根据需要按不同的电路组成各种整流器供选择使用。硅半导体整流器（见图1）与其配套的整流变压器、控制和保护系统、滤波和功率因数补偿系统、冷却系统等辅助电器和器械构成整流装置，其电压、电流和功率范围极宽，可用作一切需要直流电能场所的电源。作为电解用整流器应具有能供应低电压、大电流、大功率的性能（见电解直流电源）。在选用整流器时，除注意选择电参数外，还应注意调压、保护、冷却及设备本体的结构等问题。



图1　硅半导体整流器

电力半导体器件　用于电力整流领域的电力半导体器件，通常指1A以上的普通整流管、普通晶闸管和硅功率晶

体管。这 3 种电力半导体器件都有不少派生器件，如快速晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管及光控晶闸管等，适用于不同的领域，但多不适用于电解直流电源。

电力半导体器件的参数是关系整流器质量、效率的重要因素，设计时应留有适当的安全裕度。一般应选择额定电流值为实际通过电流值的 2.5～3 倍（均指平均值），正向或反向额定峰值阻断电压为实际承受的峰值电压值的 2～3 倍。

普通整流管　以硅单晶为基本材料，利用 PN 结单向导电性能制成的整流器件，P 为正极，N 为负极，工作结温度为－40～150℃，正向峰值电压降为 1.4～2.5V，体积小，效率高。整流管有自冷、风冷及水冷等冷却方式。普通整流管电流/电压可达到 6kA/3kV 和 3kA/6kV。

普通晶闸管　以硅单晶为基本材料制成的 PNPN 四层三端可控的开关器件，特点是只有在阳极为正电位且控制门极触发后才能正向导通，反向阻断特性与普通整流管相同，能以毫安级的电流控制大功率晶闸管整流器的工作。普通晶闸管电流/电压可达到 4.5kA/2.2kV 和 3kA/5.5kV，适用于交流频率 400Hz 以下的可控整流器。

硅功率晶体管　耗散功率 1W 以上的晶体管，基本结构与小功率晶体管相同。与晶闸管相比，它的开关时间短、具有自关断能力、饱和压降低、损耗小，但由于其功率仍较小，电压也不很高，尚不具备在电解电源装置中使用的条件。

电解用整流器　主要用作有色金属电解、食盐电解、水电解等的直流电源，其中用量最多的是铝电解和食盐电解等领域。

常用的有以整流管组成的硅整流器和以晶闸管组成的晶闸管整流器两大类。电压为 30～1600V，电流为 0.6～63kA，用数个整流器并联工作可满足 500kA级大型铝电解槽的需要。冷却方式以水冷为主。水冷式整流器与风冷式的比较，体积小，无噪声，尤其适合在电解整流所内集中使用。整流器的结构有户内式与户外式两种。户外式的整流器，连同整流变压器一起，直接安装在电解车间（工厂）旁边，可减小直流母线的引线长度，提高电解电源的功率因数与效率。

不同用途的电解用整流器，虽然规格各不相同，但要求大致相同，包括：①效率高，设备投资低；②可靠性高，不发生故障停电；③操作、维护和保养简单方便；④直流电功率计量准确；⑤电流稳定（稳定度不低于±2%），控制反应灵敏；⑥耐气体腐蚀；⑦安装面积小，安装工程简单；⑧直流输出功率留有裕量。

整流器的电路　用整流管组成的电路称为不可控整流电路，用晶闸管组成的电路称为可控整流电路。两者都可以组成单相、三相或多相整流电路。增加电路相数可以降低谐波污染的程度，增加输出直流的平滑程度，也相应增加了整流器的复杂程度。（见电解电源整流电路）

整流器额定值和负载等级　主要有额定直流电压、负载等级、额定直流电流。

（1）额定直流电压。整流装置的连续工作电压一般应留有控制裕度，以满足电压调节的需要和适应交流电压的波动。中国推荐的额定直流电压值为：1.2，1.5，2.4，3，4，4.5，5，6，7.5，9，12，15，24，30，36，40，48，60，72，80，96，110，125，220，250，440，600，750，1500V，…

（2）负载等级。通常以给出规定持续时间、恒定电压值的通用负载曲线来表示。中国推荐的标准负载等级的负载条件见表，这些等级的负载循环均以 24h 为周期。

标准负载等级的负载条件

负载等级	负载条件	典型负载日循环曲线（负载电流表示为额定直流电流的百分值）	典型用途
Ⅰ	100% I_{dN}　连续	1.0；0　24h　t	电解
Ⅱ	100% I_{dN}　连续 150% I_{dN}　1min	1.5, 1min；1.0；0　24h　t	电解和电加工
Ⅲ	100% I_{dN}　连续 150% I_{dN}　2min 200% I_{dN}　10s	1.0；2.0, 10s；1.5, 2min；0.7；0　6h　24h　t	轻工业和轻型牵引
Ⅳ	100% I_{dN}　连续 125% I_{dN}　2h 200% I_{dN}　10s	2.0, 10s；1.0；1.25；0.7；0　6　8　14　16　24h　t	一般工业
Ⅴ	100% I_{dN}　连续 150% I_{dN}　2h 200% I_{dN}　1min	2.0, 30s；I_2；1.5, 90s；0　t	中等牵引和矿山
Ⅵ	100% I_{dN}　连续 150% I_{dN}　2h 300% I_{dN}　1min	2.5, 60s；I_d；1.5, 90s；0　t	重型牵引

注：非标准负载等级以“0”级表示。I_{dN}为额定直流电流。

（3）额定直流电流。包括额定直流电流、额定过载电流和额定持续电流。额定直流电流 I_{dN} 与过载电流的关系应尽可能符合表中负载条件的规定，对表中所列的各级负载等级，均取 100% I_{dN} 的值作为额定直流电流值。中国推荐的 1A 及以上的额定直流电流值为：1，1.25，1.6，2，2.5，3.15，4，5，6.3，8，10，12.5，16，20，25，31.5，40，50，63，80，100，125，160，200，250，315，400，500，630，800，1000，1250，1600，2000，2500，3150，4000，5000，6300，8000，10 000，12 500，16 000，20 000，25 000，31 500，40 000，50 000，63 000A，…

整流器的调压与保护　控制整流器直流输出电压的方式主要有幅值调压和相位控制调压两种。整流器的保护主要有电流保护和电压保护。

（1）幅值调压。利用调压变压器改变电网侧电压幅值以调节直流电压值。交流功率 1000 kV·A 以下用感应或自耦调压器进行幅值调压；1000 kV·A 以上用有载调压变压器，也可再加饱和电抗器进行局部无级细调，如图 2（a）所示。这种调压方式的优点是功率因数高，在深度调节下输出直流

电流值不受影响，但惯性较大。

(2) 相位控制调压。利用晶闸管相位控制特性调节整流电压。这种调压方式可进行0～100%额定电压值的无级调节，响应速度快，自动控制性能好，控制功率小，易于与计算机接口实现自动稳流、自动调节电解负荷、自动计量。功率因数随相控率的增加而降低，谐波分量也随之增加。图2(b)所示是电解用晶闸管整流器电路。整流电压的控制信号U_y由给定积分器（GD）经电流调节器（LT）向触发器提供，随着U_y值的增减，触发器随即改变脉冲触发时刻，从而调节直流输出电压量。这种调压方式已愈来愈多地用于铝电解、锌电解、铜电解、水电解和食盐电解等。

(3) 保护。电力半导体器件的热容量小，需进行过电流保护与过电压抑制。装置中器件的击穿、直通等引起的内部短路和负载短接引起的外部短路等过电流故障，可采用快速熔断器、直流开关、过电流继电器等限时器件相配合的保护方式。半导体器件换相等浪涌过电压，可在器件两端并联电容或电阻-电容进行抑制。大气放电、断路器操作等引起的外部浪涌过电压，则可采用在交流或直流侧并联避雷器、压敏电阻或电容器等方法进行抑制。必要时，对晶闸管还要采取抑制电压、电流上升率的保护措施。

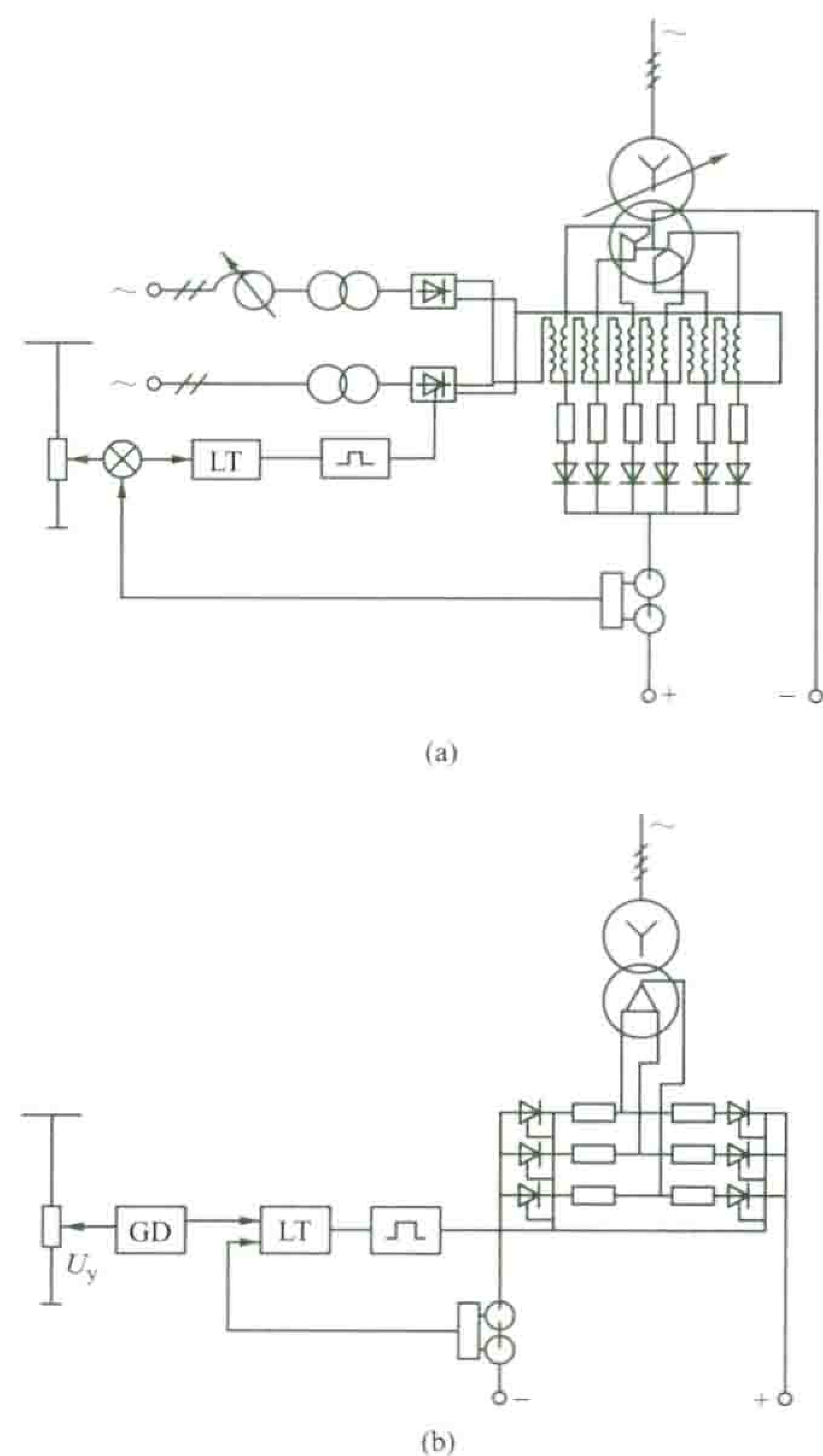


图2 整流器电路系统图
(a) 硅整流器电路；(b) 晶闸管整流器电路

整流器的功率因数与谐波　整流器的功率因数$\lambda=\gamma\cos\varphi$。其中$\gamma$为畸变因数，对脉波数为6或以上的整流器，$\gamma=1$；$\cos\varphi$为位移因数，与晶闸管延迟角、交流侧感抗、电流波形有关。由此看出，硅整流器的功率因数较高。为进一步提高电解用晶闸管整流器的功率因数，可在整流变压器一次侧进行星-三角接线倒换，或在二次侧设分接抽头等方法，以尽量减小延迟角的数值。

对电力系统来说，硅半导体整流器是一种非线性用电设备，工作时会向电力系统注入谐波电流。因此，在设计电解整流所时，要计算其谐波电流量，并采取必要措施，将其减少到规定值以下。（见整流器谐波）

整流器的冷却与结构　整流器的冷却主要是指电力半导体器件及快速熔断器等的冷却。冷却方式有自冷、风冷、液冷（主要是水冷）、沸腾冷却等，一般按功率大小或使用环境条件进行选择。电解用整流器多选用水冷。电力半导体器件散热器结构示意如图3所示。其中20A以下用自冷式，50～1000A用风冷式或水冷式，1000A以上多用水冷式。电解等用的大功率整流器的整流臂往往有2～20个半导体器件并联连接，散热器的结构常用铜或铜合金挤压成条形或块形的异形导电母线，母线两侧有通冷却水用的内孔，既作散热器，又是汇流母线。平板式半导体器件安装时，器件的外侧可压装冷却水腔，进行双面冷却，以提高器件的出力。这种用异形导电母线构成的汇流式水冷的整流器，体积小，尤其适用于同相逆并联电连接的整流器。汇流母线上有多个快速熔断器并联安装时，应对母线采取强迫冷却措施，如在母线背面焊扁铜管通水冷却等。

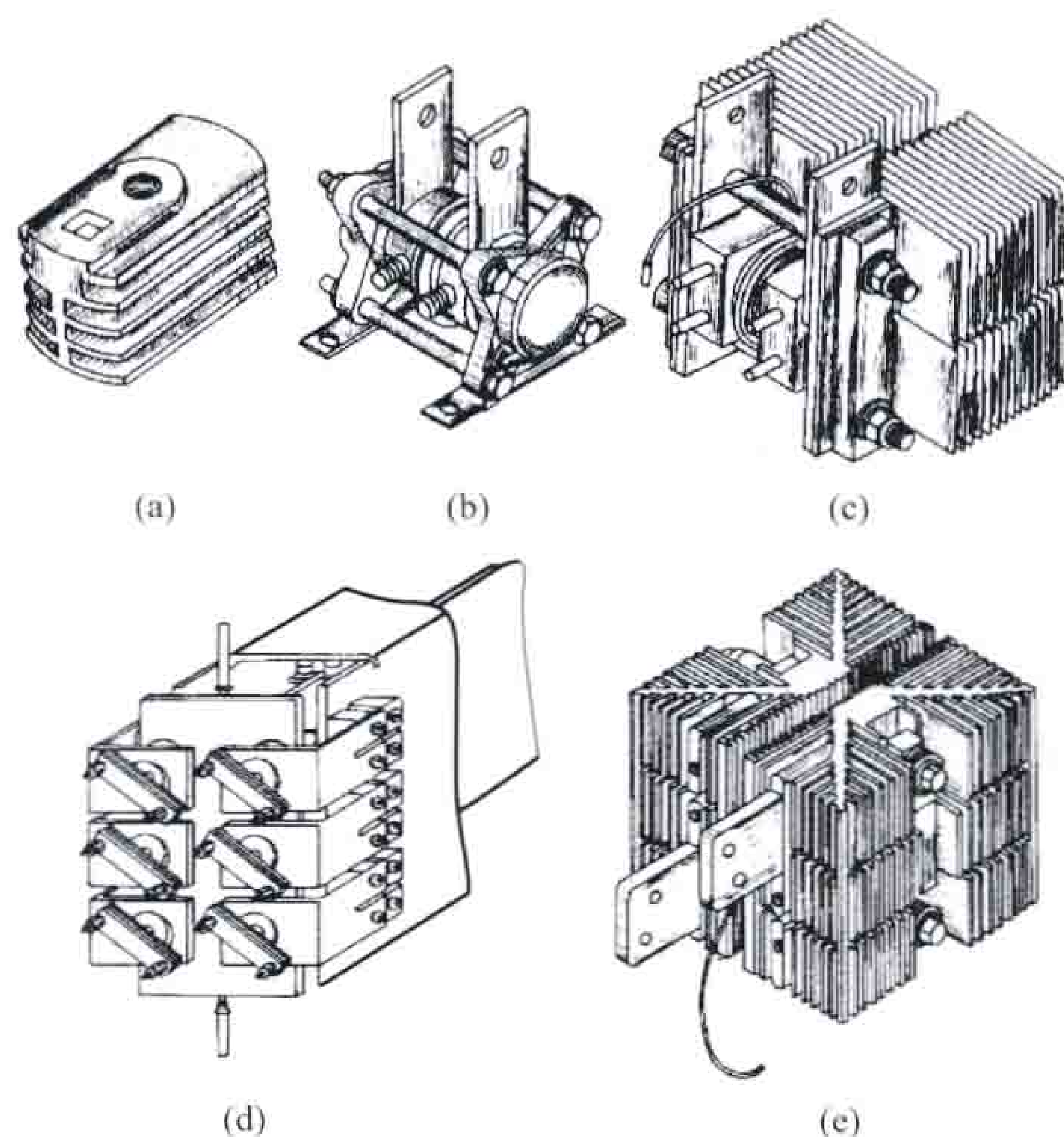


图3 电力半导体器件散热器结构示意图
(a) 自冷；(b) 水冷；(c) 热管冷；
(d) 汇流式水冷；(e) 风冷

整流器的结构有户内式与户外式两种。户内式整流器常为柜式结构，以薄钢板弯制成各种零件，用焊接或紧固件连接的方法制成柜壳。为减少涡流损耗，对局部有强磁感应处衬焊不锈钢板或非导磁性材料。国际上发展着一种大功率电解用无柜壳的整流器，它的特点是以整流臂的异形母线作为主柱，用铜或铝等非导磁材料制作零件，用焊接或衬绝缘片后采用紧固件连接成骨架，结构简单，电连接的节点少，无涡流损耗，效率高，但要求安装环境清洁。户外式整流器采用密封柜式结构，并应具有防雨、防晒、防冻等功能。户外式整流器在电解行业中的应用日益增多。



haidi dianlan

海底电缆 (submarine cable) 敷设于江河、湖泊、海域水底下的电力电缆，亦称水底电缆。它与陆上电缆相比，在主绝缘方面没有多大差异。由于海底电缆的特殊施工方法和运行条件，在铠装、金属套、制造长度等结构方面有较大的不同。各种充油海底电缆见图。

铠装 海底电缆要承受大的机械拉力，因此它的铠装一般都采用镀锌粗钢丝（钢丝直径在6mm及以上），有的还使用双层钢丝。采用浸渍防腐混合物的聚丙烯纱绳的外护层，比传统的沥青黄麻护层具有更良好的耐腐蚀性能和机械性能。


充油海底电缆

海底电缆常制造成大长度的整根电缆，它的运输需盘成圈状。虽然节距短的铠装可以减小盘绕直径，但在敷设过程中受到较大张力时，短节距（8倍铠装平均直径）铠装的海底电缆，在水底容易打结，因此一般的铠装节距需12～14倍铠装平均直径。为了减小盘绕直径，有的采用短节距预应力钢丝或双层钢丝的铠装，也有的采用内外层扭绞方向相反的铠装。

金属套 海底电缆的金属套除了为防护目的增加必要的厚度外，还需要按水域的不同采取不同的结构。未能埋在河床下面的海底电缆，受到水流冲击而振动，金属套容易疲劳，甚至蠕变开裂，因此要采取措施提高疲劳耐振性，可选用周期性应变较大的合金做金属套，也有的采用复合套（如双层铅套，铅套之间涂抹沥青，或内层铅套、外层氯丁橡胶套等其他类似结构）。敷设在海底的海底电缆，还容易受到各种侵蚀，如盐浓度较高的海水、潮汐电流和浮游生物等，要针对不同水域，采取必要的耐腐蚀措施，如挤包塑料内护套可防止化学的或电性的腐蚀，铜包带可防止凿船虫生物腐蚀。

制造长度 海底电缆一般整根制造，长度较大，超过工厂常规的生产长度时，常用厂制电缆软接头连接。由于海底电缆的铠装是连续生产，软接头的外形及电性能需与电缆本体相同。此外，当金属套绝缘强度不能承受侵入波反射叠加电压时，在整根电缆的中间，金属套和铠装应有电气连接，防止损坏金属套。

发展 世界各国已越来越重视海底电缆的应用，尤其是沿海国家，有较长的海岸线和很多岛屿，从大陆向岛屿供电或岛屿之间的联网，都需要用海底电缆。早在1915年，丹麦与瑞典海峡间就敷设了一条电压等级为20kV的海底电缆，输送容量为6MV·A。1983年在加拿大大陆西海岸和温哥华岛之间敷设并投运了双回路525kV交流海底充油电缆。每回路电缆线路总长39km（两跨，30km＋9km），最大水深400m，输送功率1200MW。2009年6月30日，中国广东与海南之间投运了双回路500kV交流海底充油电缆，输送功率600MW，每回路电缆线路总长31km。2006年在挪威大陆和高森岛（Gossen）之间敷设了世界上第一条420kV交联聚乙烯海底电缆，该线路由4根电缆组成，总长3.2km，其中2.2km将敷设在海底最大210m的深度，输送功率1000MW。不论直流的还是交流的海底电缆，都在向更高电压、更大容量方向发展。

haidi dianlan fushe

海底电缆敷设 (submarine cable laying) 敷设在水底下的一种电缆安装方式。用于输配电电缆线路跨越内河、大江、海峡，或者向岛屿和石油平台供电。海底电缆敷设（见图1）常因跨越水域不同，其敷设方法也有较大差别。海底电缆敷设不但要满足设计要求，还要根据具体工程选用最佳敷设方法及相应装备。


图1 海底电缆敷设

设计要求 敷设海底电缆的设计常由水域的宽度、水深、通航船舶的吨位、船只航行密度、渔业捕捞方式和水文资料而定。主要有路径选择、海底电缆运输包装和埋设深度。

路径选择 可分为内河、大江和海峡三类：①筑有护岸的内河一般选取狭窄河段为电缆线路路径，但不宜过于接近内河上各种建筑，如桥梁的桥墩或码头区。②大江、大河的电缆线路路径宜选择在河床由泥、沙和砾石等构成的河床稳定水域，岸线无冲刷和不是船只锚泊或避风地段，不宜选在岸线凸出地带，而宜选在岸线凹入有淤积的地段。单向水流的江河，电缆线路常敷设成向上游的弧形，受潮流影响有倒流的江河或河床常受冲刷及淤积多变的水域，电缆线路常敷设成蛇形。③海峡、岛屿和石油平台间的电缆路径除了与大江、大河的相似要求外，尚需做周密的海洋调查，要避让没有覆盖层的基岩裸露地段，必要时选择弯曲的路径绕过裸露

的岩礁或将基岩在水下爆破成电缆沟，将电缆纳入沟中。

海底电缆运输包装　有盘装、筒装和圈装3种，按电缆长度、质量和外径而定。①盘装电缆适用于长度不太长的海底电缆的包装。盘装的电缆类似于陆上敷设电缆，施工用具和施工方法较为简单。②当电缆单根长度超过电缆盘的容量和运输条件时，要采取筒装。在制造大长度海底电缆过程中，将要交货的整根电缆圈绕储存在圆筒形的电缆仓内，在出厂时将电缆自仓内输出经栈桥送至码头。先将装电缆的托盘或圆筒放在运输船上，当电缆送至托盘的顶上，经导轮将电缆送下，在托盘内一匝一匝、一层一层圈绕装载，每匝电缆绕一圈要旋转360°，圈绕的内径应由电缆单位长度内允许的扭转角而定。筒装电缆在运输中通常用大型浮吊或运输船上的吊杆装卸，一般都不经陆上运输，而是从运输船直接卸至敷设船上。筒装电缆敷设用具较复杂。由于筒内的圈绕电缆每放出一匝，电缆要扭转360°，因此要在电缆筒上方安装一定高度的退扭架，使每米电缆的扭转角在允许值之内，从而使施工船的装备复杂化。③当单根电缆的重量超过起吊设备的能力时，采用圈装包装及运输，将电缆直接圈绕在船舱内或甲板上，又称散装圈装，也有将电缆（特别是双层钢丝铠装电缆）圈绕在敷设船旋转的托盘上。圈装电缆不受电缆长度的限制，但运输不如盘装或筒装简便，此外圈装电缆还需多过驳一次，使电缆多次弯曲及扭转，对电缆质量有一定影响；若敷设船上有旋转托盘，可减少电缆扭转次数。圈装电缆的敷设一般使用垂直退扭架，采用旋转的托盘敷设，在装载及敷设的专用船上不设退扭架，而由栈桥将电缆自转盘出口处送至入水槽，这样电缆不会在装载及敷设过程中因圈绕而扭转。这种船特别适用于超高压海底电缆的敷设。

埋设深度　按通航船舶的吨位和河床的土质电缆埋设深度可分为浮埋、浅埋和深埋3种。①浮埋是将电缆敷设在河床上后，利用电缆自重下沉或放在坚硬的泥质河床上。也有用水泥装入麻袋中，覆盖在电缆上。浮埋一般适用于不通航或船只稀少的内河航道。在船只锚链长度不及水深的海洋中或没有抛锚可能的海域内，也有直接将电缆放在河床上的方式。②浅埋是将电缆敷设在水底后，用高压水泵将电缆周围泥沙吹散，利用电缆的自重沉入泥土中，深度一般不宜小于0.5m左右。浅埋适用于小型船只出入的水域和海底电缆接近堤岸浅滩登陆地段。③深埋是将电缆敷设在河床下，其深度大于通航船只的锚齿长度，一般在3～5m。深埋适用于大型船舶往来的海域。深埋可以用电缆埋设机，也可用挖泥船将河床挖成需要深度的电缆沟，待电缆敷入沟内后覆土回填。国内施工力量较强的施工单位的水力机械埋设犁的埋设深度可达2～6m。用埋设犁埋深时具有开沟宽度狭及回淤快的优点。

敷设装备及方法　敷设海底电缆时，电缆牵引端常固定在电缆的首端，敷设船向对岸航行，边航行边敷设电缆（见图2）。由于海底电缆铠装的退扭力远大于陆上电缆，防止增加扭力和消除退扭力是海底电缆敷设的特点之一。海底电缆敷设时的关键操作：①要控制敷设船按设计路线航行，如航行轨迹远离原设计路径时，电缆长度会不够；②要控制好电缆放出的速度与敷设张力，以保证在敷设过程中电缆不会打结。舟山多端电压源型直流输电工程海底电缆敷设见图3。



图2　厦门集美—高崎海底电缆工程敷设船进行海底电缆敷设

敷设装备　海底电缆敷设装备技术发展日新月异：①敷设船利用GPS系统卫星导航定位，同时测绘电缆在海底经纬度点的位置；②采用海底电缆埋设机（即海底机器人，具有埋设检测功能），海底机器人以预定速度自动跟踪海底电缆埋设路径，在边敷边埋过程中检测海底电缆深度位置及埋设状态。



图3　舟山多端电压源型直流输电工程海底电缆敷设（李彦　摄）

海底电缆敷设机具有电缆盘的支架及轴、控制电缆放出速度和张力的制动装置及履带牵引装置、导轮或滑槽、张力监视装置、尺码计和入水槽等，这些海底电缆敷设的基本机具在盘装电缆敷设、筒装电缆敷设和圈装电缆敷设3种敷设方式中都要使用。

盘装电缆敷设　由于电缆盘能在盘轴上转动，电缆只有装盘退扭力，只要敷设船按电缆设计路径航行，盘转动时放出的电缆因自重而沉入水底，然后按需要可进行埋深工作。

为了防止电缆在敷设过程中打结，在敷设时要按水深控制电缆的入水角和张力。张力、水深、电缆重力和入水角之间的关系可用下面近似计算公式表示

$$T=\frac{HW}{1-\cos\alpha}$$

式中 T 为敷设时的电缆张力，N；H 为水深，m；W 为单位电缆在水中的重力，N/m；α 为电缆入水角，(°)。

筒装电缆敷设　电缆在圈入筒时，每一匝电缆扭转

360°，使电缆内有扭转应力，在放出时要让电缆退扭消除扭转应力。因此，筒装电缆敷设时，需有足够高度的退扭架，其高度通常不低于筒装电缆内圈周长的1/2或外圈的直径。通常用电缆履带牵引机将电缆拉至退扭架，电缆通过退扭架和倾斜滚轮通道架后，可以采取和盘装电缆相似的方式进行敷设。

圈装电缆敷设　可分为转盘圈装电缆敷设和散装圈装电缆敷设两种。①转盘圈装电缆敷设是将电缆置于下有滚轮可自由旋转的圆盘上，盘边有动力驱动机，电缆可随转盘旋转放出，类似盘装电缆的敷设。转盘圈装敷设在电缆装载或放出时电缆不会被扭转，对绝缘不会产生不良影响。虽然敷设船上的装备复杂，但它适用于大长度超高压海底电缆的敷设。②舱内或甲板上的散装圈装电缆敷设方法与筒装电缆相同，即必须用退扭架和倾斜滚轮通道架，以消除每圈电缆内的扭转应力。圈装敷设通常需用大长度的电缆敷设船敷设。

电缆登陆　海底电缆的首尾两端登陆是技术较高作业，如处理不妥，电缆会打结。登陆的电缆长度越短越好，用轮胎浮运电缆上岸。首端可直接牵引上岸，尾端电缆要先以Ω形放出浮于海面上，而后牵引登岸。

hanjie

焊接

(welding; jointing)　利用外部能量，通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件达到原子接合的永久性连接方法。利用电能的焊接称为电焊。用于焊接的加工设备叫焊机。

焊接是材料连接加工中的一种经济快速的热加工技术。利用焊接，几乎可以实现任何两种金属材料，以及某些金属材料与非金属材料之间的永久性连接；可实现以小拼大，制成大型的、经济合理的结构；可以在结构的不同部位采用不同性能的材料，充分发挥各种材料的特点；焊接还可实现超薄、超细材料之间的焊接。相对于铸件，焊接件具有气密性好、质量轻的特点。

分类　根据焊接时加热和加压情况的不同，焊接通常分熔化焊、固相焊和钎焊三大类。

熔化焊　在焊接过程中将焊件接缝处金属加热到熔化状态，不加压力而完成焊接的方法，简称熔焊。熔化焊时，热源将焊件接缝处的金属和必要时添加的填充金属迅速熔化形成熔池，熔池随热源的移动而延伸，冷却后形成焊缝。根据加热方法的不同，可分为电弧焊、电渣焊、高能束焊等几种。熔化焊的适用面很广，在各种焊接方法中用得最普遍，尤其是电弧焊。

固相焊　在压力作用下（加热或不加热）实现工件结合的一类焊接方法。焊接过程中焊件任何部分均不发生熔化，也不加填充材料。通常包括锻焊、冷压焊、扩散焊、爆炸焊、摩擦焊、搅拌摩擦焊、热压焊、滚压焊、超声波焊及挤压焊等。由于固相焊通常没有熔化过程，因此也没有像熔焊时的有益合金元素烧损和有害元素浸入焊缝的问题，但固相焊的施焊条件苛刻，适用面较窄。

钎焊　用比母材熔点低的金属材料作为钎料，用加热将钎料熔化，用液态钎料润湿母材和填充工件接口间隙并使其与母材相互扩散的焊接方法。钎焊变形小，接头光滑美观，适合于焊接精密、复杂和由不同材料组成的构件，如蜂窝结构板、汽轮机叶片、硬质合金刀具和印刷电路板等。钎焊前对工件必须进行细致加工和严格清洗，除去油污和过厚的氧化膜，保证接口装配间隙。间隙一般要求在0.01～0.1mm之间。

历史与发展　焊接是在19世纪末随着电力工业的发展而发展起来的。1885年，俄国人H. H. 别纳尔多斯（H. H. Бенардос）发现了碳极电弧。1887年，美国人E. 汤姆逊（E. Thomson，1853—1937）发明了用于薄板焊接的电阻焊。20世纪初，手弧焊进入实用阶段。20年代美国制成了自动电弧焊机。1930年美国发明了埋弧焊。40年代和50年代初，钨极和熔化极惰性气体保护焊，以及二氧化碳气体保护焊相继在美国和苏联问世，促进了气体保护电弧焊的应用和发展。1951年苏联发明了电渣焊，成为大厚度焊件的高效焊接方法。50年代中，超声波焊、摩擦焊和扩散焊又相继在美国和苏联获得开发。50年代末和60年代中出现的等离子体弧焊、电子束焊和激光焊，标志着高功率密度熔焊的发展，使得许多难以用其他方法焊接的材料和结构得以焊接。20世纪90年代，英国焊接研究所发明的搅拌摩擦焊是最具有潜力的固相连接技术。将自动控制、信息处理及计算机等技术应用于焊接领域，产生了一些新的焊接方法与工艺，如一体化焊机、冷焊法、数字化焊机等，使得焊接自动化得以迅速发展。焊接已广泛用于机械、电子、建筑、船舶、航天、航空、能源等领域。

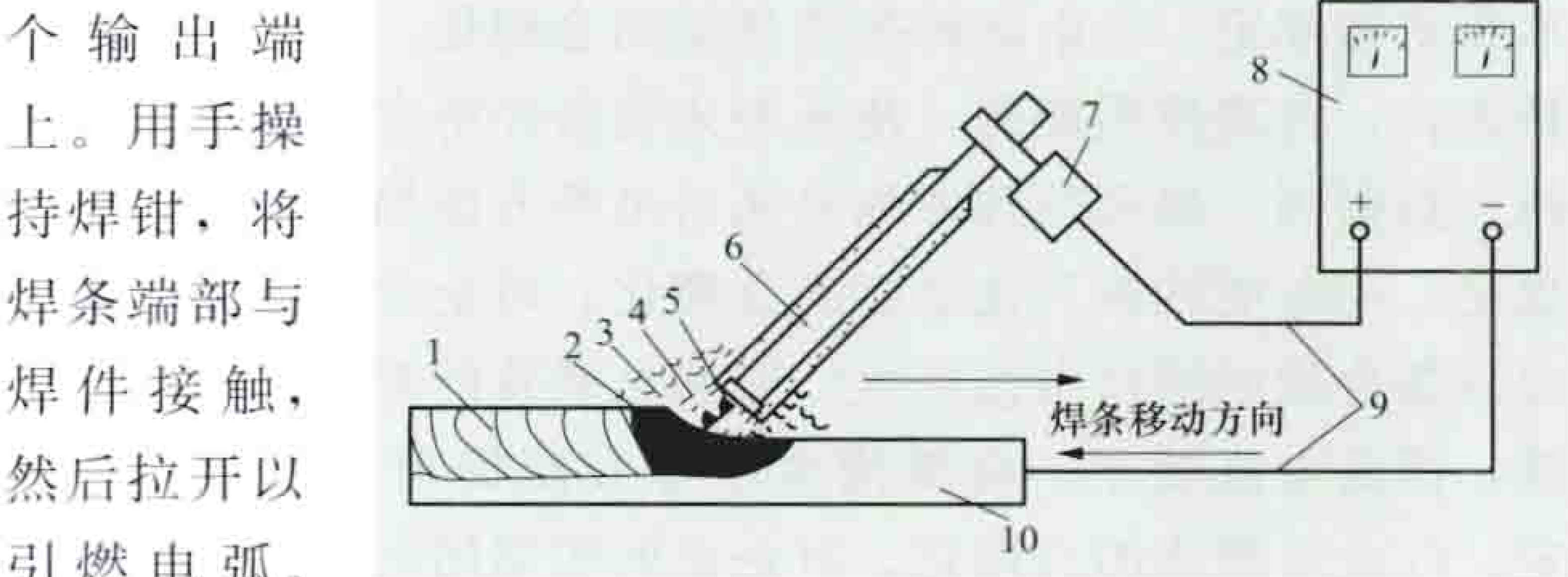
hantiao dianhuhan

焊条电弧焊

(shielded arc welding)　用手工操纵焊条进行焊接的电弧焊，也称手工电弧焊或手弧焊。焊条电弧焊是一种最古老的电弧焊方法，主要用来焊接碳钢、低合金钢、不锈钢、铜及铜合金、铸铁等。

焊条电弧焊机由弧焊电源、焊接电缆和焊钳组成。弧焊电源一般为交流，也可以是直流；焊接电缆俗称焊把线，是YC电缆（通用橡套电缆）的一种，用于连接弧焊电源输出端与焊钳的专用电缆，其特性是电阻大、电压低；焊钳是用以夹持焊条（或碳棒）、传导电流并进行焊接的工具。焊条电弧焊电压范围为16～40V，电流范围为20～500A。焊接时，电流、电压值的选择取决于焊件的材质和厚度、焊条的类型和规格，以及焊缝的形式和位置。

如图所示，焊条夹持在焊钳内，焊钳和焊件分别接在弧焊电源的两个输出端上。用手操持焊钳，将焊条端部与焊件接触，然后拉开以引燃电弧。电弧热使附近的焊件金属（母材）、焊芯和焊条药皮熔化。随着焊条的行进，由熔化的母材、焊芯和药皮内的金属粉末所形成的合金凝固成为焊缝。在焊接过程中，焊芯外围的药皮不仅保护焊芯金属不被空气氧化，而且产生的熔渣和气体还能保护熔池免受空气的侵害，同时还起到稳定



焊条电弧焊示意图

1—焊缝；2—熔池；3—保护性气体；4—电弧；5—熔滴；6—焊条；7—焊钳；8—焊接电源；9—焊接电缆；10—焊件

电弧和向熔池渗入合金元素等的作用。

药皮焊条做成各种直径，一般为1.6～6mm。小直径焊条用于以小电流焊接薄板和各种位置上的焊接。大直径焊条能用大电流，适用于平焊位置，能焊接中、厚焊件，有较高的熔敷率。焊条已经标准化、市场化，有许多种类型和规格。

焊条电弧焊的设备简单轻便，适宜于远距离和大空间范围内作业，因此在建筑结构、管道工程和造船工业中至今仍是主要的焊接方法。在机械修配车间，一般只需要几种焊条就可解决大部分的焊接问题，所以焊条电弧焊在机械工业部门也得到广泛应用。焊条电弧焊的缺点：焊接速度较慢，焊后要对焊缝除去凝固的熔渣，焊接质量不够稳定，对焊接人员操作技术要求高（焊接质量在一定程度上取决于焊接人员的操作水平），以及难以用于活泼金属、难熔金属、低熔点金属及其合金的焊接等。

heli yongdian biaozhun

合理用电标准　（standards for rational electricity utilization）　为使电能得到高效并充分利用所制定的技术与管理准则。合理用电标准是能源标准之一，也是用电企业和电气制造厂应共同遵守的依据和准则。国际标准化组织（ISO）制定了一系列国际能源标准。

合理用电标准分为技术管理标准，方法标准，设备和器具标准三类。①技术管理标准。主要对用电设备运行管理所做的统一规定。②方法标准。为分析、测试、检验、鉴定用电设备是否实现合理用电所规定的统一方法与程序。③设备和器具标准。对用电设备和器具的原材料性能、设备结构、工艺方法等方面所做的统一规定。

1983年，中国颁布了GB 3485—1983《评价企业合理用电技术导则》，为制定合理用电政策提供了科学合理并具有可操作性的理论和方法，有效促进了节能工作的深入开展。1998年，对GB 3485—1983进行了修订。其主要内容包括：①企业供电的合理化。对企业供配电系统确定合理的供电方式，选择最佳运行方式，降低供配电线路损失，提高供电效率等方面提出技术要求和规定。②电能转换为机械能的合理化。对企业合理选择和使用电动机，最佳匹配机电设备与用电负载，保持效率高、损耗低的最佳运行状态等方面提出技术要求和规定。③电能转换为热能的合理化。对企业选择加热方式，合理使用能源，使电加热设备经济合理地运行，在减少热损失、提高热效率和电能利用率方面提出技术指标和规定。④电能转换为化学能的合理化。对企业选择电化学反应设备合理的经济电流密度，控制电解质的浓度、纯度、温度，提高电流效率，降低槽电压等方面提出技术指标和规定。⑤企业照明的合理化。对企业的照明用电合理选择电光源和灯具（见照明器）、照明方式、照度水平等方面提出技术指标和规定。

中国关于合理用电的国家标准和地方标准还有GB/T 5623—2008《产品电耗定额和管理导则》、GB/T 8222—2008《用电设备电能平衡通则》、GB/T 13462—2008《电力变压器经济运行》、GB/T 13466～13470—1992《交流电气传动风机（泵类、压缩机）系统经济运行和计算方法》、GB/T 13471—2008《节电措施经济效益计算与评价方法》、GB/T 12497—2006《三相异步电动机经济运行》、GB/T 10201—2008《热处理合理用电导则》、GB/T 12455—2010《宾馆、饭店合理用电》、GB 8871—2001《交流接触器节电器》、DB31/T 71—1999《红外电加热装置合理用电》、DB31/T 178—2002《照明设备合理用电导则》、DB37/T 1493—2009《商场、超市合理用电》等。

hetong nengyuan guanli

合同能源管理　（energy performance contracting）　一种以减少的能源费用来支付节能项目全部成本的节能投资机制。参与这个机制的主体是节能服务公司和需要节能的用能单位。节能服务公司与用能单位以合同形式约定节能项目的节能目标，向用能单位提供节能潜力分析、节能项目可行性分析、项目设计、项目融资、设备选购、施工、节能量检测、人员培训、节能量监测等项目全过程服务并保证实现合同中承诺的节能量和节能效益。用能单位可以使用未来的节能收益为设备和运行系统升级，提高能源利用效率，降低运行成本，合同结束后可得到全部设备和节能效益，并按合同约定从节能效益中向节能服务公司支付其投入及合理利润。

产生背景　合同能源管理是在20世纪70年代发生能源危机的情况下提出的。在出现世界能源危机，能源成本成倍增长，企业利润空间被大大压缩的大背景下，很多企业发现，通过为能源用户提供优化能源利用方式的技术改造或服务，可以节约资源并减少污染排放，同时还可以获得商业利润。于是，一个以用户能源需求优化管理为市场的经营方式由此产生。合同能源管理在市场经济国家中逐步发展起来，基于这种节能投资机制迅速发展了新的节能产业，尤其是在美国、加拿大和德国等国家，由此带动和促进了全社会的能源投资和节能项目的普遍实施。

基本类型　中国的合同能源管理项目有节能效益分享型、节能量保证型和能源费用托管型三种模式。这三种模式可以独立运作也可以组合成复合模式运作。①节能效益分享型。节能服务公司提供资金和全过程服务，在用能单位配合下实施节能项目，在合同期间与用能单位按照合同约定比例分享节能收益。合同期满后，项目节能效益和项目所有权归用能单位所有。②节能量保证型。用能单位提供节能项目资金并配合项目实施，节能服务公司提供全过程服务并保证节能效果，用能单位向节能服务公司支付服务费用。如果项目没有达到承诺的节能量，节能服务公司按照合同约定赔付未达到的节能量的经济损失。③能源费用托管型。用能单位委托节能服务公司进行能源系统的节能改造和运行管理，系统按照合同规定的标准运行后，用能单位支付托管费用；节能服务公司通过提高能源效率降低能源费用，按照合同约定收取服务管理费。否则，节能服务公司应按合同给予赔偿。

关键内容　实施合同能源管理的关键内容主要包括能源审计、项目设计、签订合同、节能量的监测和计算、风险控制。

（1）能源审计。能源审计是开展合同能源管理项目的前期工作。节能服务公司要对用能单位的耗能设备及其运行情况进行测定，分析提出可以进行节能改造的设备和措施并预

测可能达到的节能效果，从节能潜力上判断项目的可行性，避免发生项目损失。

（2）项目设计。通过分析项目改造前、后的能源消费量和能源成本，进行节能量的监测和确认等，提出利用成熟的节能技术对用能设备或生产工艺进行提高能源利用效率和降低能源成本的节能改造方案；对项目管理、工程时间、资源配置、预算、设备和材料的进出协调等进行规划，向用能单位提交节能项目设计书。

（3）签订合同。实施节能项目前，节能服务公司与用能单位协商并签订能源服务合同，明确合同双方的责任和义务、项目内容、约定的节能量、节能量的计算及测量确认等，确定利益分享的方式。

（4）节能量的监测和计算。设备的实际运行效果通常与预测的节能量有一定差别，节能效益分享的依据是通过实际监测得到的能耗数据。节能量的监测和计算需把握：①能耗监测方法要得到用能单位认可，并在合同中达成共识。②节能效果的计算要相对合理并“保守”一些，避免出现实际节能效果达不到合同的承诺。③合理选择测量点、测量仪器仪表以及用能设备的负荷状态。

（5）风险控制。合同能源管理是一项高风险业务，节能服务公司负责为项目筹措资金并承诺和保证节能量，实际为用能单位承担了投资、技术和财务等方面的主要风险。风险控制的主要内容：①选择业务状况较好、财务制度健全、资信良好的用能单位实施节能项目，降低投资风险；②认真编写可研报告和节能效果计算，选择好的技术和产品，选择优秀的供应商和施工队伍等，有效防范技术风险；③制定合理的年度投资/财务计划和效益分享年限，控制与项目有关的间接成本、附加成本和相关杂费，保证投资回报，降低财务风险；④力争将各类风险控制在合同中，以合同约束来保障项目的正常执行。

中国合同能源管理　1997 年，合同能源管理的概念引入中国。1998 年，中国政府同世界银行、全球环境基金共同开发和实施了大型国际合作项目——世界银行/全球环境基金中国节能促进项目，选择北京、辽宁、山东三个地区，引进和示范基于市场的合同能源管理机制。2003 年 11 月，国家发展和改革委员会与世界银行启动了项目二期，提高了中国的能源效率，减少了 CO_2 及其他污染物的排放，扩大了国内能效投资，促进了中国节能服务产业的形成和发展。2004 年 11 月，国家发展和改革委员会将“推广能源合同管理”纳入《节能中长期专项规划》（发改环境〔2004〕2505 号）。到 2005 年底，中国节能协会节能服务产业委员会的会员已达到 156 家。合同能源管理以及基于合同能源管理的节能服务产业在中国发展迅速。2010 年开始，国家对从事合同能源管理的节能服务公司实施名单备案制度，截至 2013 年 4 月，国家发展和改革委员会、财政部已公布 4 批节能服务公司备案名单总计 2354 家。同时，采取税收优惠政策，对相关企业给予营业税、增值税和企业所得税减免，并安排财政奖励专项资金扶持合同能源管理项目的发展。2010 年 6 月，合同能源管理投融资交易平台在北京环境交易所正式上线运行，节能服务公司可借助该平台通过向第三方投资者出售未来的服务收益实现融资。合同能源管理机制正在被中国社会各界广泛认可并接受，将促进资源的整体规划与合理配置，以及节能产业化的进程。

hongwai jiare

红外加热　(infrared heating)　吸收由电能产生的以红外辐射为主兼有光辐射的能量而进行的*电加热*，又称电红外辐射加热。红外辐射是一种电磁波，其波长范围为 0.83～1000μm，介于可见光（0.36～0.83μm）与微波（1mm～1m）之间。根据国际电工委员会标准 IEC 60050（841），红外辐射分为近（短波）红外辐射（波长＜2μm）、中（中波）红外辐射（波长 2～4μm）和远（长波）红外辐射（波长＞4μm）3 个波段，见图 1。工业上应用的红外加热的波长范围主要为 2.5～30μm。

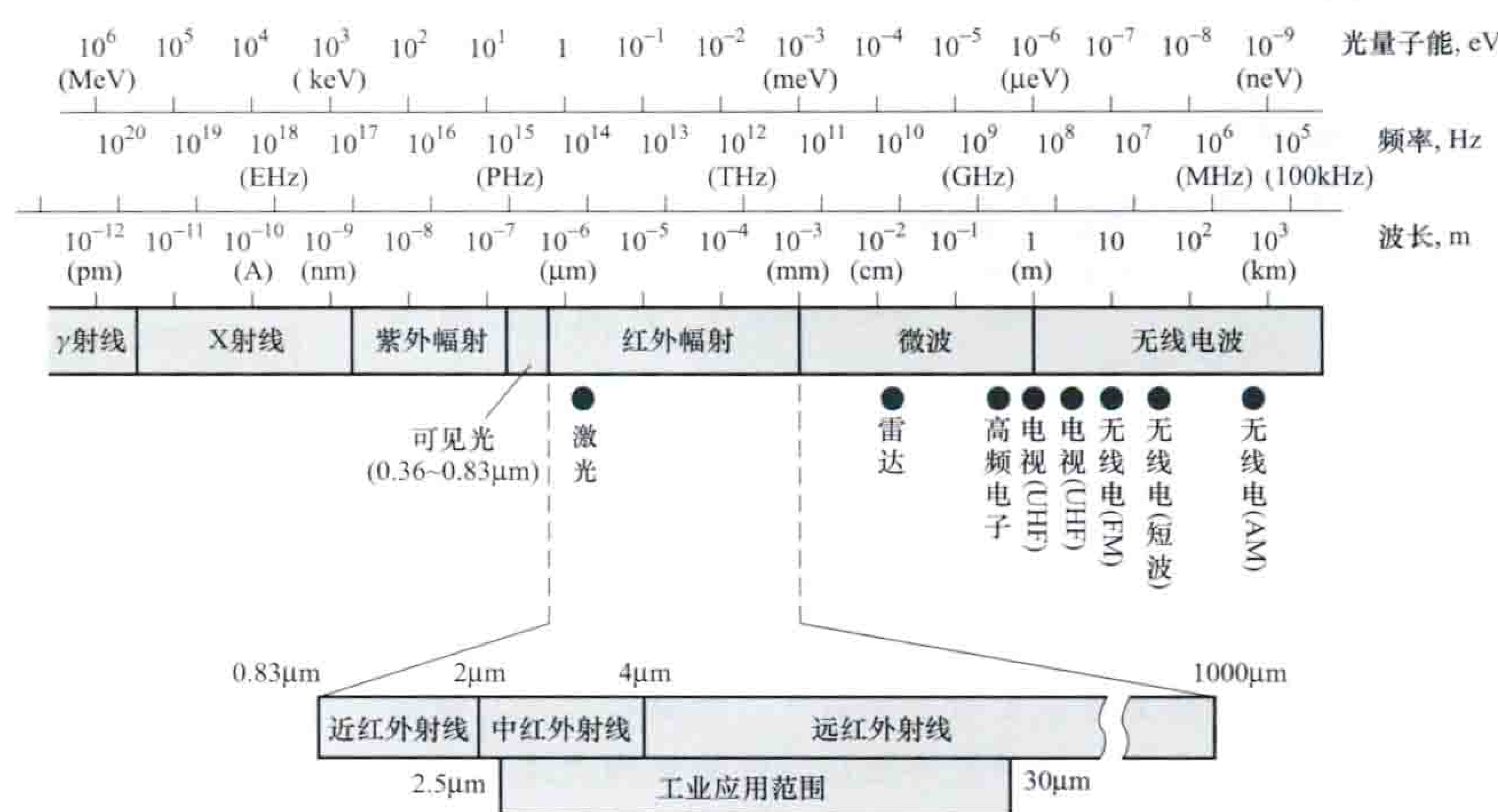


图 1　红外辐射波长分类

红外辐射入射到物料表面时，一部分被吸收，一部分被反射，还有一部分透射过物料。被物料吸收的红外辐射重新转变成热能使物料加热。红外辐射能透入被加热物料表面一定深度，而对加热空间内的空气、媒介物基本上不加热，故具有热效率高、加热速度快、电能消耗少、作业环境好等优点，特别在低温（50～650℃）区段，这些特点尤为显著。因此，红外加热特别适合于 650℃ 以下低温区段的加热。另外，红外加热装置还具有结构简单、设备费用低、易维护、占地面积小、易实现连续自动化生产等优点。

应用及其条件　红外加热的用途很广，主要用于汽车、自行车、机电零部件、家电、木工制品、树脂制品等表面涂饰物的烘烤、干燥，电子元件的烧成，橡胶的二次硫化，化学药品原材料的焙烧、干燥处理，皮革涂饰、药品处理后的干燥，陶瓷成形品彩釉涂敷前的预加热和涂敷后的烘烤，木材、纤维、纸张、谷物、茶叶、烟叶、蔬菜、水产品的脱水干燥，食品的烤制、杀菌，钢铁材料焊接前的预加热与焊缝退火，以及人体的医疗、保健、美容等。

不同物料对红外辐射的吸收能力不同，即使是同一种物料，对不同波长的红外辐射的吸收能力也不尽相同。例如，水对波长为 3，6，15μm 附近的红外辐射吸收率高达 90%以

上，而对 2，4μm 附近的红外辐射吸收率只有 10%左右。因此，红外辐射加热时，通常根据被加热物料的种类选择合适的红外辐射源与辐射源表面温度，使辐射功率足够大，并且辐射的峰值波段应与物料高吸收率波段相匹配，使辐射能被充分吸收；但对有些物料可采用偏匹配或非匹配。另外，还可采用在红外加热元件的表面涂敷合适的红外涂料、适当选择辐射源与被加热物料之间的距离以及利用反射镜集中辐射等措施来提高红外辐射加热的效果。

元件与装置　常用的红外加热元件有灯式、管式和板式几种类型，见图 2。这些元件辐射表面的温度在 300～1000℃，辐射波长集中在远红外波段。为提高元件单位面积的辐射功率，有的元件常在元件表面涂敷高辐射率红外涂料 TiO_2-Fe_2O_3、NiO-Cr_2O_3、SiC、SiO_2、TiO_2-ZrO_2 等。

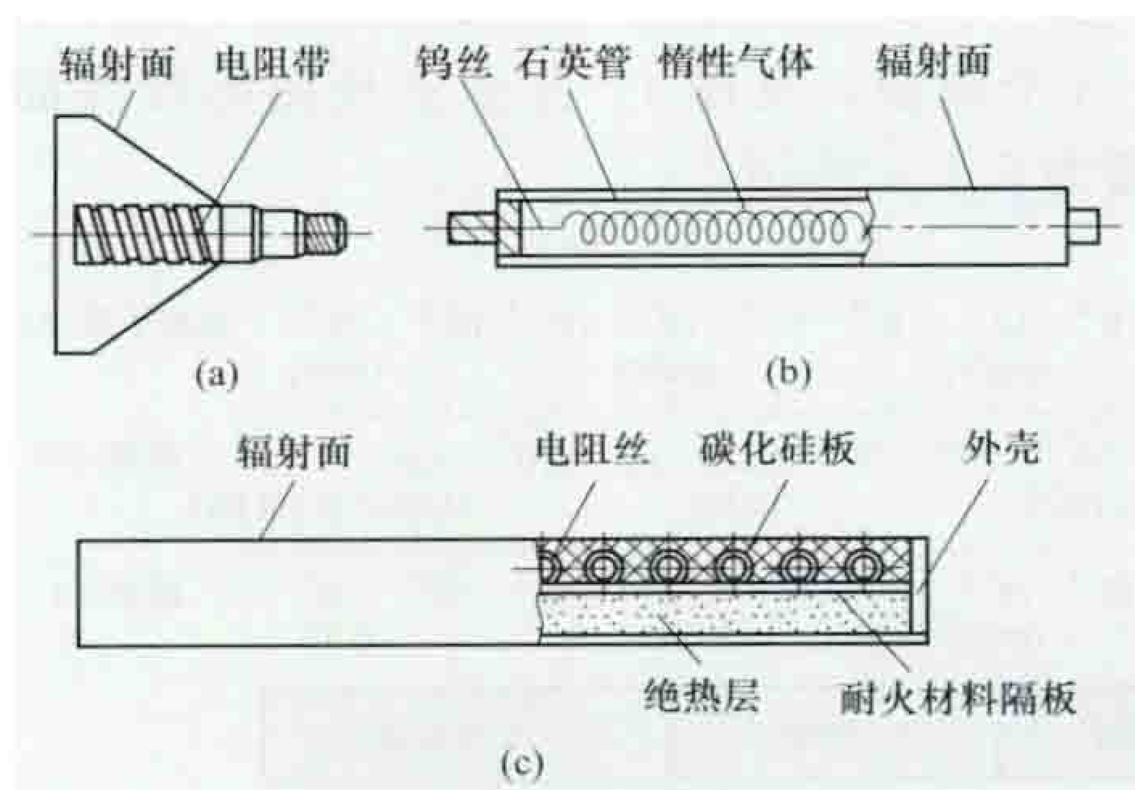


图 2　红外加热元件示意图
(a) 金属电阻体灯式；(b) 红外石英管式（反射屏未示）；(c) 碳化硅板式

灯式红外加热元件的结构与一般照明灯泡类似。为使电能尽可能多地转换为红外辐射，钨丝的温度比照明灯泡低，约为 2400～2500K，辐射波长在1～2.5μm。玻璃壳内壁涂有反射层，能使红外辐射集中于某一方向。

管式红外加热元件主要有石英管式、金属管式等几种形式，以石英管式为主。这种红外加热元件的结构大体与普通管式加热元件相同，所不同的是套管采用具有强红外辐射能力的红外石英管，并配有金属反射罩或陶瓷反射板，石英管内充惰性气体对加热元件——钨丝进行保护。其辐射波长集中在 5μm 以上的波段内，用于远红外辐射加热。

板式红外加热元件有导电陶瓷板式、碳化硅板式、石英板式等多种形式，其中，碳化硅板式红外加热元件是远红外工业加热领域中使用最多的。

红外加热装置由炉体、红外加热元件、固定架、物料支承和传送机构等组成。其结构形式、红外加热元件的供电和控制等与电阻炉类似。

历史与发展　红外辐射是英国天文学家 F. W. 赫歇耳（F. W. Herschel，1738—1822）于 1800 年在观察太阳光辐射时发现的。1835 年法国科学家 A. M. 安培（A. M. Ampere，1775—1836）进一步证实了红外辐射与可视光是同一种类型的光波（电磁波）。20 世纪 30 年代美国福特汽车制造公司首次将红外辐射加热用于汽车车身表面涂饰的烘干固化。早期使用的红外加热装置是钨丝红外灯，属近红外辐射加热。60 年代末日本开发了远红外辐射加热器，并成功地应用于工业生产。90 年代美国推出了“远红外定向强辐射”加热技术及其产品。中国于 20 世纪 50 年代开始红外加热技术的应用，70 年代开展了远红外加热技术的研究与应用，80 年代末进行了乳白石英管红外辐射加热器的研究与应用，并于 1993 年成功地开发了高强度红外辐射加热技术。作为一种节能和方便的加热方式，红外加热的应用正在不断扩大。

huhan dianyuan

弧焊电源　（arc-welding power source）　为电弧焊提供电源的设备。弧焊电源是用于电弧焊的特种电源。这类电源除以内燃机为动力的弧焊发电机外，都由 380V 低压配电网供电，输入功率一般不超过 100kW，输出电流有的是交流，有的是直流（也有交直流两用的），输出电压不超过 100V。弧焊电源的负载是焊接电弧。为使电弧稳定燃烧且能适应一定范围的焊接规范，弧焊电源应可调节并使之具有合适的输出特性。

输出特性　包括静态特性（又称外特性）和动态特性。

静态特性表示弧焊电源在不同负载时，稳态负载电流与输出端电压之间的关系。在正常焊接范围内，电流增加时电压下降率大于 7V/100A 的静态特性叫下降特性；电压下降率小于 7V/100A 或上升率小于 10V/100A 的叫平特性。下降特性中，电流稍有增加电压即急剧下降的叫陡降特性或恒流特性。不同种类的电弧焊对电源的静态特性有不同要求，见表 1。

表 1　各种电弧焊适用的弧焊电源静态特性

电弧焊名称	弧焊电源的静态特性		
	交　流	直　流	
	下降特性	下降特性	平特性
焊条电弧焊	适　用		不适用
埋弧焊	适　用		
TIG 焊（氩弧焊）	适用，应为陡降特性		不适用
MIG 焊（熔化极惰性气体保护焊）	不适用	可　用	适　用
MAG 焊（熔化极混合气体保护焊）	不适用	可　用	适　用
药芯焊丝气体保护焊	可　用	适　用	
等离子体弧焊	适用，应为陡降特性		不适用

动态特性是指当负载状态发生突然变化时，输出电流及端电压对时间的关系，用来表征弧焊电源对负载瞬态变化的反应能力。动态特性对用于熔化极电弧焊的直流弧焊电源，特别是弧焊发电机有重要意义。中国对此制定了相应的技术标准，对各项动态特性指标做了规定。

分类　弧焊电源分为交流弧焊电源、直流弧焊电源和脉冲弧焊电源 3 类。弧焊电源设备的种类、特点及适用范围见表 2。

交流弧焊电源　又称弧焊变压器。其类别、特点和用途见表 3。在中国，交流弧焊电源额定电流 I 的系列规定为 100，125，160，200，250，315，400，500，630，800，1000A；负载电压 $U=20+0.04I$，V；额定负载持续率在 20%～100%范围内。

直流弧焊电源　分静止和旋转式两类。前者又称弧焊整流器，后者又称弧焊发电机。其种类、特点和用途见表 4。

直流弧焊电源与焊件和电极的连接有正接和反接之分。焊件接电源正极，电极接电源负极的接法叫正接或正极性。反之，焊件接电源负极，电极接电源正极的接法叫反接或负

表 2　弧焊电源设备的种类、特点及适用范围

弧焊电源设备种类	弧焊变压器	弧焊整流器	弧焊发电机	弧焊逆变器
	输出交流	输出直流或直流脉冲	输出直流	输出交流
运行特点	大多数接单相电网，功率因数较低，空载损耗小，噪声小，易于维修，价格低	大多数接三相电网，空载损耗较小，噪声较弧焊发电机小，维修较弧焊变压器复杂	大多数接三相电网，空载损耗大，效率低，噪声大，维修较难，但其过载能力强，输出脉动小	可接单相或三相电网，效率可达 80%～90%，功率因数可提高到 0.99，空载损耗极小，维修较复杂
适用范围	一般结构件的手工电弧焊（常用酸性焊条），埋弧焊，铝、镁及其合金的钨极氩弧焊	较重要焊接结构件的手工电弧焊（常用碱性焊条）、埋弧焊、各种气体保护焊	较重要焊接结构件的手工电弧焊（常用碱性焊条）、埋弧焊、各种气体保护焊	可用于各种弧焊方法，是一种极有发展前途的弧焊电源

表 3　交流弧焊电源的种类、特点和用途

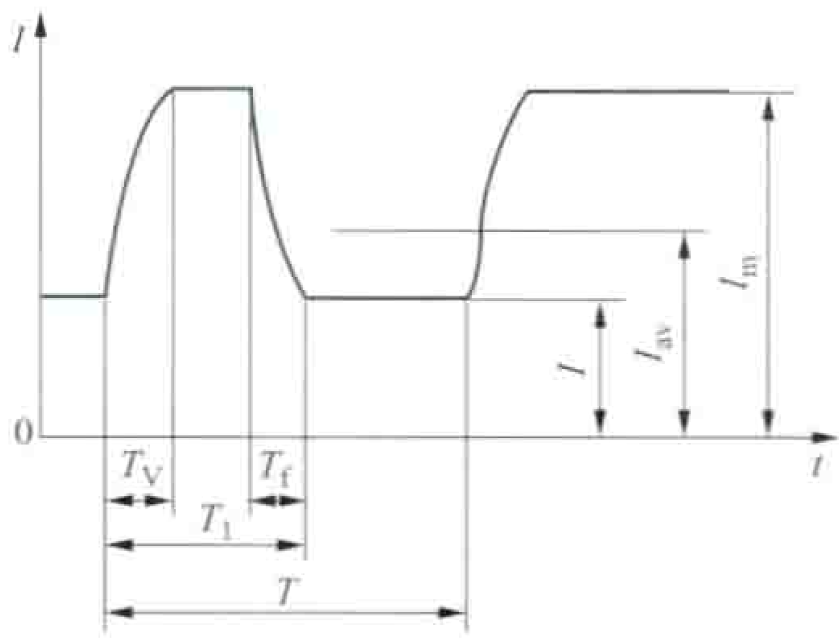
种　类		结　构　特　征		特 点 和 用 途
串联电抗器式	动铁电抗器式	由平特性变压器和动铁芯电抗器组成，用后者调节电流	分体式——主变压器和电抗器磁路上分成两体	多头式弧焊变压器，一个主变压器附两个以上电抗器，可供几个焊工同时操作
	饱和电抗器式		同体式——主变压器和电抗器磁路上有公共部分	一般容量较大，用作 400A 以上埋弧焊电源
增强漏磁性	动铁式	用可动的铁芯为磁分路，变更动铁芯位置，改变变压器一、二次绕组的漏抗，从而调节电流		材料省，体积小，较经济，一般用于 400A 以下手弧焊
	动圈式	改变变压器一、二次绕组的漏抗，从而调节电流		电弧稳定性较好，但较动铁式体积大，费料
	抽头式	一、二次绕组的主要部分绕在两个铁芯柱上，用更换抽头的办法改变漏磁，调节电流		体积小、耗料少，一般制成 160A 以下小容量，低负载率，适合于小型修配站用

表 4　直流弧焊电源的种类、特点和用途

种　类		静态特性	结　构　特　征	一 般 用 途 和 特 点
弧焊整流器	动铁式或动圈式	下降特性	动铁式或动圈式变压器加整流元件组	供采用药皮焊条的手弧焊用
	磁放大器式	平特性或下降特性	平特性变压器加整流元件组，变压器有抽头以调节电压	供一般等速送丝的自动、半自动弧焊机用
	晶闸管式		变压器接晶闸管整流元件组，带有输出闭环反馈控制，以获得所需外特性	可制成供手工、自动或半自动弧焊用的电源。节能，可设计成带起弧控制、电网电压补偿、遥控电弧、推力控制等功能
	晶体管式		在变压器接整流元件组后再接供调节用的大功率晶体管组	可制成供自动或半自动弧焊用的电源。控制灵活
	逆变式	下降特性	由整流器、逆变器、变压器、整流器四级组成	可制成供手工、自动或半自动电弧焊用的电源。体积小、质量轻、效率高
弧焊发电机	电动机驱动的发电机	平特性或下降特性	由电动机、电流调节及指示装置和发电机组成	用于手弧焊、等速送丝自动或半自动电弧焊。效率低、噪声大、材料消耗多
	柴（汽）油机驱动的发电机		以柴油机或汽油机驱动直流弧焊发电机	适用于野外、无电源地区作业，如管道敷设等

极性。焊接时应根据焊接方法、金属种类、接头形式和焊接位置等适当选择极性。

脉冲弧焊电源　与一般直流弧焊电源的主要区别在于能提供周期性交替变化的脉冲电流。如图所示，脉冲弧焊电源所输出的电流是以直流 I 为基础，每隔一定脉冲周期 T（相应的脉冲频率为 $f=1/T$），输出一个幅值为 I_m、持续时间为 T_1 的直流脉冲。I、I_m、T（或 f）、T_1 以及平均电流 I_{av}、脉冲上升时间 T_V、脉冲下降时间 T_f 等值的大小影响焊接电弧所提供的热功率、电弧的稳定性和熔滴过渡形式等。



脉冲弧焊电流波形

脉冲弧焊电源常用的有晶闸管式和晶体管式两种，可由相应的直流弧焊电源改制而成。

脉冲弧焊技术已被公认为是一种高效、优质的焊接技术，在 TIG 焊、MIG 焊和 MAG 焊以及等离子体弧焊中都得到推广应用。在热敏感性大的高合金钢或稀有金属要求单面焊接双面成形的管件、薄件，以及全位置焊、窄间隙焊等方面，脉冲焊接技术都显示出独特的优越性。

历史与发展　早在 20 世纪 20 年代弧焊变压器和弧焊发电机就已得到推广应用。随后，只在结构形式、使用性能和制造技术上有所改进。到了 60 年代，随着晶闸管和晶体管的出现，弧焊电源的发展出现了飞跃。先是研制成功了多种弧焊整流器和脉冲弧焊电源。70 年代末 80 年代初又出现了逆变式直流弧焊电源。1982 年瑞典 ESAB 公司率先推出了

晶闸管弧焊逆变器产品，其后，美国、日本等国的焊接设备公司都相继推出了各自的逆变器产品。1993 年在德国埃森国际焊接与切割博览会上展出了应用于手工弧焊、TIG 焊、MIG 焊、MAG 焊、CO_2焊等各种规格和用途的弧焊逆变器产品。随着智能控制技术的发展，神经网络和模糊控制技术将在弧焊逆变器中得到广泛应用。

huganqi erci fuzai

互感器二次负载 （secondary load of current transformer and potential transformer） 电流、电压互感器二次侧接入的有功和无功电能表的电流与电压线圈或其他测量仪表的电流、电压线圈及它们与互感器的连接线带来的阻抗（或导纳）值。

电流互感器二次负载以接入的测量仪表、导线等的阻抗总值 Z_b 来表示。其额定二次负载是指在保证准确度条件下，允许其二次侧可接的阻抗总值 Z_N。为保证互感器计量准确要求，应满足 $25\% Z_N \leqslant Z_b \leqslant Z_N$。

电压互感器二次负载以与其二次绕组并联的测量仪表电压线圈的总导纳来表示。电压互感器的额定负载也叫额定容量，指在二次电压为定值，保证准确度的条件下，规定允许接入的负载，通常以视在功率伏安数表示。

huganqi jianyan

互感器检验 （test of current transformer and potential transformer） 检测互感器性能是否符合规定的过程。互感器检验在标准条件下进行，其目的是保证电能计量装置的准确与可靠。互感器制造厂出厂前除进行本项检验外，还包括其他需要达到的产品质量、工艺水平和技术水平等性能方面的型式试验内容。

互感器检验项目除常规的外观检查、绝缘强度试验、绝缘电阻测量外，重点进行绕组极性检查、电流互感器退磁试验和互感器的误差试验。

绕组极性检查 检查某一瞬间互感器一次绕组与二次绕组电流方向的关系。方向相反，则一次电压和二次电压相加，称为加极性，反之为减极性。在减极性情况下，对电压互感器而言，加于仪表电压线圈上的电压和一次电压方向是相同的；对电流互感器而言，流过仪表电流线圈的电流和一次电流方向也是相同的。所以一般仪用互感器规定为减极性。检查互感器绕组极性可用比较法或直流法。

电流互感器的退磁试验 在误差试验前对电流互感器每个铁芯中的剩磁进行消退。直流法对电流互感器检查极性之后，或在交流大电流下切断电源以及二次绕组偶然开路的情况下，互感器内铁芯产生的剩磁将影响互感器的误差特性。退磁方法有：①强磁场退磁（也称开路退磁）；②大负荷退磁（也称闭路退磁）；③电流表、电压表法退磁。

互感器的误差试验 电流互感器和电压互感器的误差各国都有限值标准，中国规定的限值见表 1 和表 2。

表 1 测量用电流互感器误差限值

准确度级别	比值误差（±）					相位误差（±）				
	倍率因数	额定电流下的百分数值				倍率因数	额定电流下的百分数值			
		5A	20A	100A	120A		5A	20A	100A	120A
0.5	%	1.5	0.75	0.5	0.5	(′)	90	45	30	30
0.2		0.75	0.35	0.2	0.2		30	15	10	10
0.1		0.4	0.2	0.1	0.1		15	8	5	5
0.05		0.10	0.05	0.05	0.05		4	2	2	2
0.02		0.04	0.02	0.02	0.02		1.2	0.6	0.6	0.6
0.01		0.02	0.01	0.01	0.01		0.6	0.3	0.3	0.3
0.005	10^{-6}	100	50	50	50	10^{-6} (rad)	100	50	50	50
0.002		40	20	20	20		40	20	20	20
0.001		20	10	10	10		20	10	10	10

注：1. 额定二次电流 5A，额定负荷 7.5V·A 及以下的互感器，下限负荷由制造厂规定；制造厂未规定下限负荷的，下限负荷为 2.5V·A。
2. 额定负荷电阻小于 0.2Ω 的电流互感器下限负荷为 0.1Ω。
3. 制造厂规定为固定负荷的电流互感器，在固定负荷的±10%范围内误差应满足本表要求。
4. 资料来源：JJG 313—2010《测量用电流互感器》。

表 2 测量用电压互感器误差限值

准确度级别	比值误差（±）						相位误差（±）					
	倍率因数	额定电流下的百分数值					倍率因数	额定电流下的百分数值				
		20A	50A	80A	100A	120A		20A	50A	80A	100A	120A
0.5	%			0.5	0.5	0.5	(′)			20	20	20
0.2		0.4	0.3	0.2	0.2	0.2		20	15	10	10	10
0.1		0.20	0.15	0.10	0.10	0.10		10.0	7.5	5.0	5.0	5.0
0.05		0.100	0.075	0.050	0.050	0.050		4.0	3.0	2.0	2.0	2.0
0.02		0.040	0.030	0.020	0.020	0.020		1.2	0.9	0.6	0.6	0.6
0.01		0.020	0.015	0.010	0.010	0.010		0.60	0.45	0.30	0.30	0.30

续表

准确度级别	比值误差（±）						相位误差（±）					
	倍率因数	额定电流下的百分数值					倍率因数	额定电流下的百分数值				
		20A	50A	80A	100A	120A		20A	50A	80A	100A	120A
0.005	10^{-6}	100	75	50	50	50	10^{-6} (rad)	100	75	50	50	50
0.002		40	30	20	20	20		40	30	20	20	20
0.001		20	15	10	10	10		20	15	10	10	10

注：1. 额定二次负荷小于等于 0.2V·A 时，下限负荷按 0V·A 考核。
2. 资料来源：JJG 314—2010《测量用电压互感器》。

互感器误差试验方法有直接法和比较法两种。

直接法也叫绝对法或电阻法，它是用标准电阻进行测量的。

比较法又叫相对法，它是将被试互感器和标准互感器进行比较，从而测出被试互感器的误差。常用的是比较法，试验用的主要设备：①标准电压、电流互感器；②互感器校验仪。

huaxue dianyuan

化学电源　(electrochemical power source)　将化学能直接转变为电能或将电能直接转变为化学能的储能或换能装置，又称电化学电池、化学电池，简称电池。其电化学式可写成：㊀电极｜电解质｜电极㊉，式中“｜”表示界面。化学电源是将正、负电极活性物质用隔膜隔开，浸在电解质内，装在容器中构成的。当接通外电路时，在正、负电极和电解质接触的界面上发生电化学反应，释放出电能。电化学电池主要有原电池、蓄电池、贮备电池、燃料电池、光电化学电池等。

化学电源和机械电源相比，其优点是使用方便，无噪声，性能可靠，转换效率高，对环境的适应性较好，而且其性能参数，如容量、电流、电压及几何形状等都可在较宽的范围内设计、选择，但价格较贵。

作为一种独立电源，化学电源的应用范围极广，是某些设施中不可缺少的部分。在日常生活中多用作便携式照明器、应急照明器、计算器、家用电器、电子钟表、助听器、心脏起搏器等的电源。在工业中用作控制、信号电源，备用驱动电源，仪器仪表、矿灯电源。在交通运输领域中用作电瓶车、搬运车、汽车、列车、船舶、铁路信号、航标灯等的动力、信号、照明电源。在通信设施中用作电话、移动无线电信设备的电源。在国防及尖端技术领域用作导弹、鱼雷、卫星、导航飞船等的动力、信号、照明电源。

发展简史　化学电池的发展经历了二百余年的历史。早在 1799 年，意大利科学家 A. 伏打（Alessandro Volta，1745—1827）就创造了第一个实用电池，称为伏打电堆（Volta pile）。19 世纪 30 年代起，很多原电池开始商品化，其中最重要的是 1868 年发明的勒克朗谢电池。19 世纪末，以法国人 R. L. G. 普朗特（R. L. G. Planté，1834—1889）为开端，瑞典人 W. 琼格纳（W. Jungner）、美国人 T. A. 爱迪生（Thomas Alva Edison，1847—1931）、S. 鲁宾（Samuel Ruben）相继发明了铅酸、镉-镍、铁-镍和锌-汞等电池。1946 年，法国人 H. 安德烈（H. André）首先制成小型、轻量的锌-氧化银蓄电池。第二次世界大战期间出现了贮备电池。1965 年，第一个燃料电池在宇航中获得应用。20 世纪 90 年代已有种类繁多、性能各异、适用于各种不同要求和场所的电池，且原电池、蓄电池、燃料电池的界限逐渐被打破。电池的发展趋势是：①要求有高能量、长寿的小型及微型电池，以便能长期置入人体或其他器件中，或更便于携带；②要求有高比能量、起动性能好、质量轻、寿命长的电池，用以驱动各种电动车辆，代替污染环境的汽车及其他动力车辆的电源；③发展廉价的、利用氢能的燃料电池，以改变能源结构；④要求有适用于多种军事用途的、能长期贮存、高可靠性的各种电池；⑤发展能满足空间探索和海洋开发等尖端技术领域所需要的电池。

原理　化学电源是由正、负电极和电解质构成的。负极活性物质发生氧化反应，释放出电子，由负极流经外电路传递到正极；正极活性物质接受电子发生还原反应。电解质中的阴、阳离子则借电解质的离子导电作用，在电池内部两极间传输电子，形成闭合的导电回路，产生由化学能直接转换来的电能。以图示的丹尼尔电池为例，金属锌和铜分别与其硫酸盐溶液接触，中间隔以多孔的绝缘材料制成的隔膜，就构成一个简单的电池。其电化学式可写成



$$(-)\ Zn \mid ZnSO_4 \mid CuSO_4 \mid Cu\ (+)$$

式中“｜”代表隔膜。

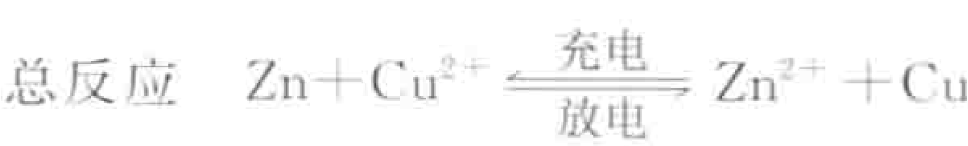
电池反应为



负极反应　$Zn \longrightarrow Zn^{2+} + 2e$（氧化反应）



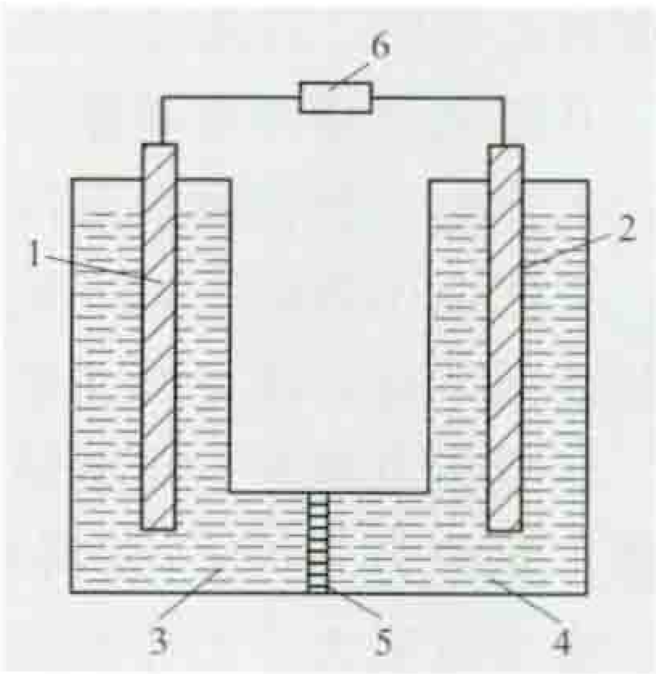
正极反应　$Cu^{2+} + 2e \longrightarrow Cu$（还原反应）



总反应　$Zn + Cu^{2+} \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} Zn^{2+} + Cu$

电池中产生电能的物质，如丹尼尔电池中的锌称为负极活性物质，铜称为正极活性物质，统称活性物质。

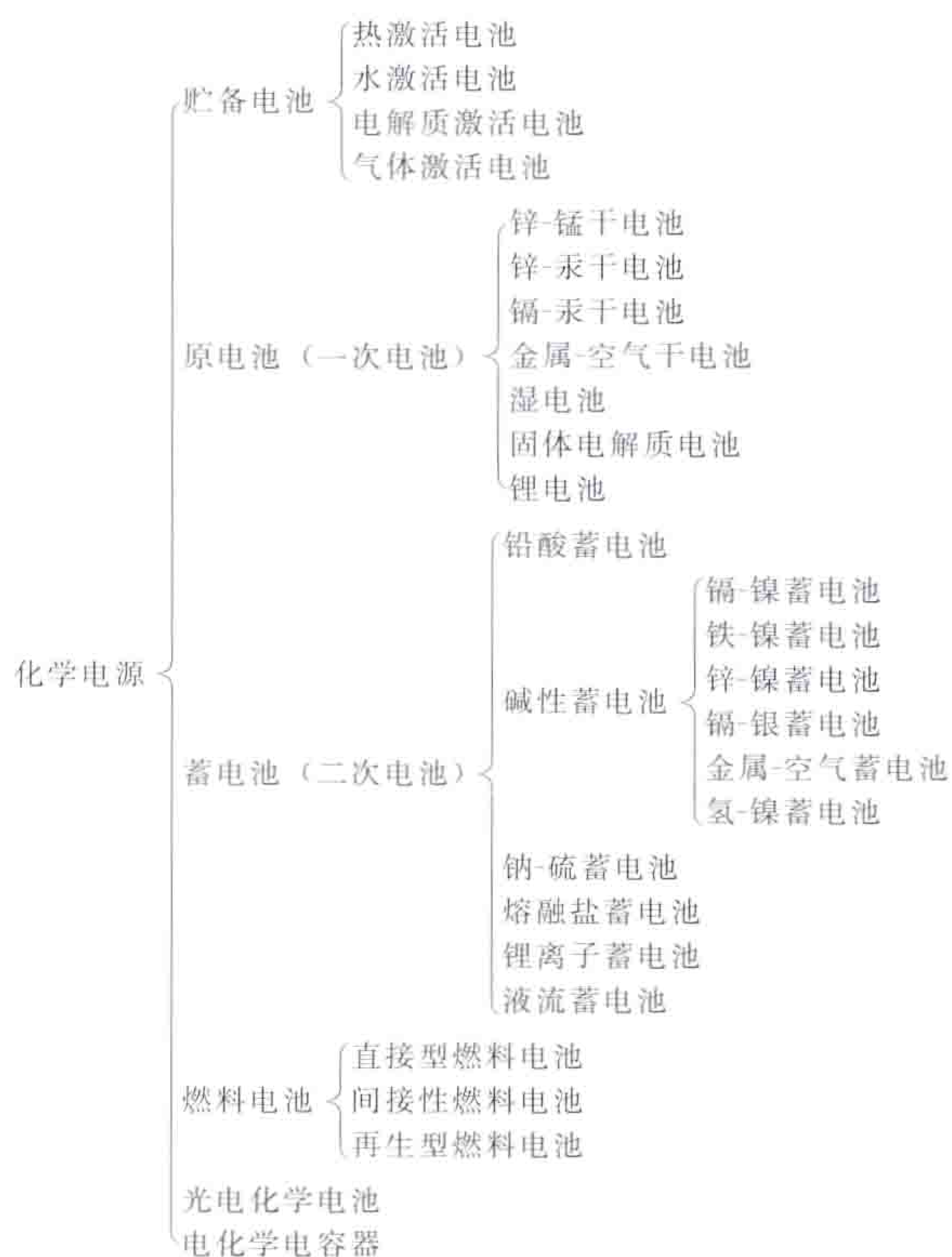
结构　化学电源主要由正极活性物质、负极活性物质、电解质、隔膜和容器五部分组成。正极活性物质常用各种金属氧化物、卤素及卤化物、氧或含氧酸盐等。负极活性物质则用各种电极电位较负的金属或氢。电解质多用酸、碱和盐的水溶液，也有采用有机溶液，以及熔融盐、胶体或固体电解质的。隔膜常用微孔橡胶、塑料、纤维素薄膜等高分子化合物等。容器多用橡胶、塑料、玻璃、镀镍钢或不锈钢等耐腐蚀材料，做成圆筒形、长方形、纽扣形等敞口的或密封的电池。



丹尼尔电池示意图
1—铜正极；2—锌负极；3—硫酸铜溶液；4—硫酸锌溶液；5—多孔隔膜；6—负载

分类　按工作性质来说，电池正、负极因氧化、还原反应放电消耗的活性物质，用充电方法可得到恢复，即反应是可逆的，则所构成的电池称为蓄电池，又称二次电池。相反，若反应只能在一个方向上进行，即不可逆反应，则构成的电池称为原电池，又称一次电池。此外，就其反应性质虽属原电池，但为克服其湿贮存期间的自放电问题，又能满足随时使用的需要，而设计成使用前可以快速激活的一次电池，称为贮备电池。若两个电极的反应物和生成物不是贮存在电池内部，而是由外部连续不断供给和从电池中及时排除的，这类电池称为燃料电池。利用光电化学反应产生电动势和电流的电池称为光电化学电池。将电荷分离并贮存在界面双电层中的储能装置称为电化学电容器。

化学电源种类繁多，除上述以工作性质分类外，还可按所用的电解质分类为水溶液电解质（又分为酸性、碱性和中性电解质）电池、有机电解质电池和固体电解质电池等。电池分类如下所示：



性能指标　电池种类繁多，选用时必须了解其性能。电池的主要性能指标有开路电压、工作电压、容量、使用温度、寿命和贮存期，以及特定使用条件所需具备的特殊性能。

开路电压指外电路断开时两电极间的电位差。

工作电压指接通负载时两电极间的电位差。输出电流越大，工作电压越低。以一定的电流放电时，工作电压随时间的延续而下降，降至终止电压电池就不应该再使用。

容量指电池在一定的放电速率、一定的温度下能释放的电量，单位为 A·h。每种电池都有其额定容量，放电速率快、输出电流大、工作温度高都将减少电池容量。电池的单位质量包含的电量称为质量比能量，单位为 W·h/kg；单位体积包含的电量称为体积比能量，单位为 W·h/L，有时也用 A·h/L。质量比能量、体积比能量统称比能量，是电池性能的重要指标。

各种电池都有一定的使用温度范围，超出该范围时，电池不能工作，甚至损坏。

电池有规定的贮存期，超期将因自放电消耗而失效。蓄电池有规定的使用年限或充、放电循环次数。

对用于特殊场合的电池，要求其有抗震、耐冲击、防爆、耐压以及质量轻、体积小等不同的性能。

参考书目

郭炳焜．化学电源-电池原理及制造技术．长沙：中南大学出版社，2009.

huanjingbi

环境比　（surround ratio）　与车行道两侧边缘相邻的 5m 宽的带状区域的平均照度与该车道上 5m 宽的带状区域（或 1/2 宽度的车道上）的平均照度之比，用符号 *SR* 表示。对机动车驾驶员而言，眼睛的视觉状态主要取决于路面的平均亮度，而道路周边环境的亮与暗也会干扰眼睛的视觉适应状态。环境明亮时，眼睛的视觉对比灵敏度会降低，这时需要提高路面的平均亮度以补充视觉的损失；相反，如果周边环境过暗，驾驶员的眼睛适应了相对明亮的路面，对周边视觉黑暗区域中的物体就难以确认，易诱发交通事故。总之，机动车驾驶员的视觉要求道路照明设计必须要考虑周边环境的照明。

道路照明的主要目的是创造一个明亮的路面，以它作为背景可以看清物体。然而道路与道路两侧往往有许多不同高度、形态及颜色的车辆、建筑、树木、行人、绿化带以及道路附属设施等与道路路面并存，通常无法以路面作为背景，而是以道路外边的环境作为背景，尤其是在弯道或曲线路段路面上的各种物体就更要在道路周围的背景衬托下才会被看到。这样，道路外边环境的适度照明有助于机动车驾驶员更有效地观察路面情况并及时做出判断。

huanwang danyuan

环网单元　（looped network power supply unit）　由两个及以上环网开关柜组合而成，能实现环网供电的一种配电站，也称环网站。用于中压电缆线路分段、联络及分接负荷，最适用于短路容量不大的城市电缆配电网。环网单元一般由两路取自不同电源点的进线，若干出线组合而成，进出线采用电缆连接。



图 1　户外环网单元

环网单元按环网开关柜的组装形式分为不可扩展形和可扩展形两种；按使用场所可分为户内环网单元和户外环网单元（见图 1）。户外环网单元通常安装在箱体内，也有采取地埋及地下安装方式的，起保护及美观作用。环网单元的典型接线如图 2 所示，负荷开关采用空气绝缘、

SF_6 绝缘两种方式，用于分合负荷电流。由于负荷开关看不到明显断开点，因此环网单元中的每个环网开关一般都配有切断负荷、隔离电路及可靠接地三个工作位置。环网单元具有结构简单、体积小、组合方便、供电可靠性及安全性高等特点，广泛应用于城市配电网中。中国常用的环网单元产品种类包括 SM6 系列、RM6 系列、SAFE 系列等。

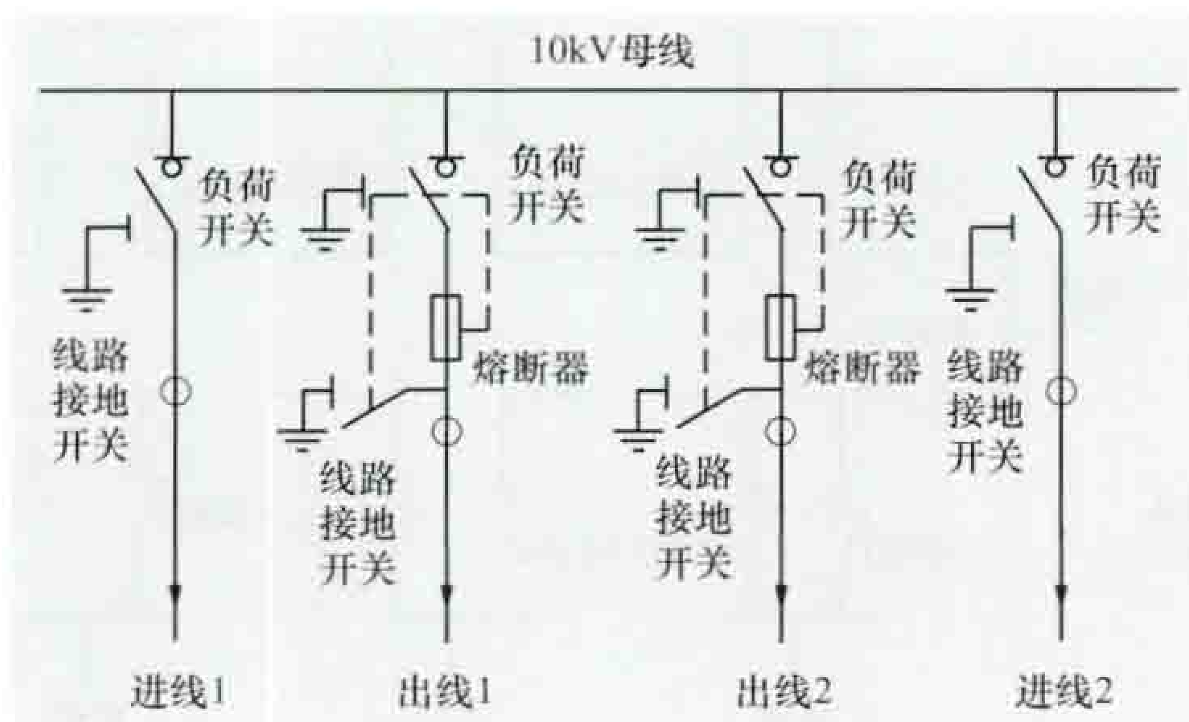


图 2　环网单元典型接线图

huanwanggui zhongduan

环网柜终端 (ring main terminal unit, RMTU)

对中压配电网电缆网络中环网柜进行监控的配电网自动化系统终端。在实际工程中，常将其称为 DTU（distribution terminal unit）。环网柜终端要对环网柜内所有的进线、出线开关进行测控；个别情况下，为节省投资，仅测控 2 个进线开关。通常，每个开关采集 3 个相电流或 2 个相电流和 1 个零序电流，电压信号的采集根据电压互感器的配备情况处理。在仅有一个线电压输入信号时，环网柜终端不能测量功率参数。

环网柜终端正常运行时由线路电压互感器供电，电源模块通常提供 24V 和（或）48V 直流电源，给终端本身、通信终端以及开关分合闸操动机构供电；配备蓄电池或超级电容，在线路停电时提供不间断电源。

环网柜终端现场安装方式多采用集中式结构，其构成与配电站所终端的集中式结构类似。新型环网柜内一般预留终端的安装空间，可采用柜内壁挂或柜内立式结构，由于柜内安装空间有限，其结构要紧凑，通常以不超过环网柜内一个间隔单元的尺寸为宜；对于不具备柜内安装条件的老式环网柜，可采用柜外立式安装结构。个别情况下，也可采用分布式结构，其构成和安装方式与配电站所终端的分布式结构类似。由于通常在户外运行，环境比较恶劣，特别是在中国南方地区夏季湿热天气里，环网柜内温度可能达到 70℃，且湿度大并有凝露现象出现，测控单元的印制电路板（PCB）、接线端子会出现受潮、凝露现象，因此，对环网柜终端的环境适应能力，特别是耐高温、防潮、防凝露能力有着很高的要求。

huanwang kaiguangui

环网开关柜 (ring main unit)

实现环网供电方式的一种高压开关柜。一般适用于短路容量为 500MV·A 以下的城市配电网中，用来连接形成配电电缆环网，也可作为控制和保护 2000kV·A 及以下的配电变压器以及箱式变电站高压侧开关设备。一般具有防误闭锁和带电显示装置。

环网开关柜按柜内绝缘介质不同分为空气型和六氟化硫型；按安装方式不同分为落地式、带升高座落地式、墙挂式和户外独立安装式；按柜体结构不同分为三回路单元、四回路单元和多回路单元。常用功能单元有线路负荷开关、变压器保护（保护方式有熔断器＋负荷开关、组合式熔断器负荷开关和断路器），母线（电缆）进、出线（带或不带电压互感器），计量单元（包括电流和电压互感器和接地开关）等。三回路单元是环网开关柜的典型结构，由两个线路负荷开关单元和一个变压器保护单元组成，见图。



环网开关柜

六氟化硫型环网开关柜，除熔断器单独装在一个密封金属外壳内和操动机构位于箱壳板后面以外，其他所有功能回路和导电部分都装在一个充以 0.1MPa 表压的六氟化硫金属密封箱内，结构紧凑，体积小，且不受外部环境的影响。

环网开关柜中线路负荷开关单元的负荷开关通常采用空气、六氟化硫或真空型，基本参数为：额定电流 400～600A，关合峰值电流 40～62.5kA，频繁操作型负荷开关可在额定电流和功率因数为 0.7 时合分 100 次；接地开关关合电流达 40～62.5kA。变压器保护单元回路额定电流一般为 200A，当采用熔断器＋负荷开关或组合式熔断器＋负荷开关时可保护 1250kV·A 及以下变压器，当采用断路器时可保护 3000kV·A 及以下变压器。

huanxing wangluo

环形网络 (looped power distribution network)

自一个供电点或母线引出，连接多点负荷点后返回至同一供电点或母线，或者返回到不同电源点或母线的配电网络，简称环网。相对于辐射形网络，环形网络具有供电可靠性高、运行灵活等优点。

环形网络接线见图 1，配电环网正常运行时，选择适当的地点采用断路器或负荷开关实现开环运行；一旦环路中某区段发生故障，利用分段隔离装置将故障区段隔离，其他区段可继续供电。配电环网在电源端的断路器上配置继电保护，干线故障时电源端断路器动作跳闸，部分线路停电。通过网络中的分段开关将故障隔离，然后经倒闸操作恢复其他段的供电，基本符合 N－1 供电安全准则的要求。如用人工恢复供电，间隔时间较长，若在环网上配置配电自动化装置，则能自动识别、隔离故障，恢复供电。对用户而言，其供电可靠性相当于双电源的供电方式，但投资相对较小。配电网环形接线方式可以较好地适应现代城市发展对供电可靠性的更高要求。

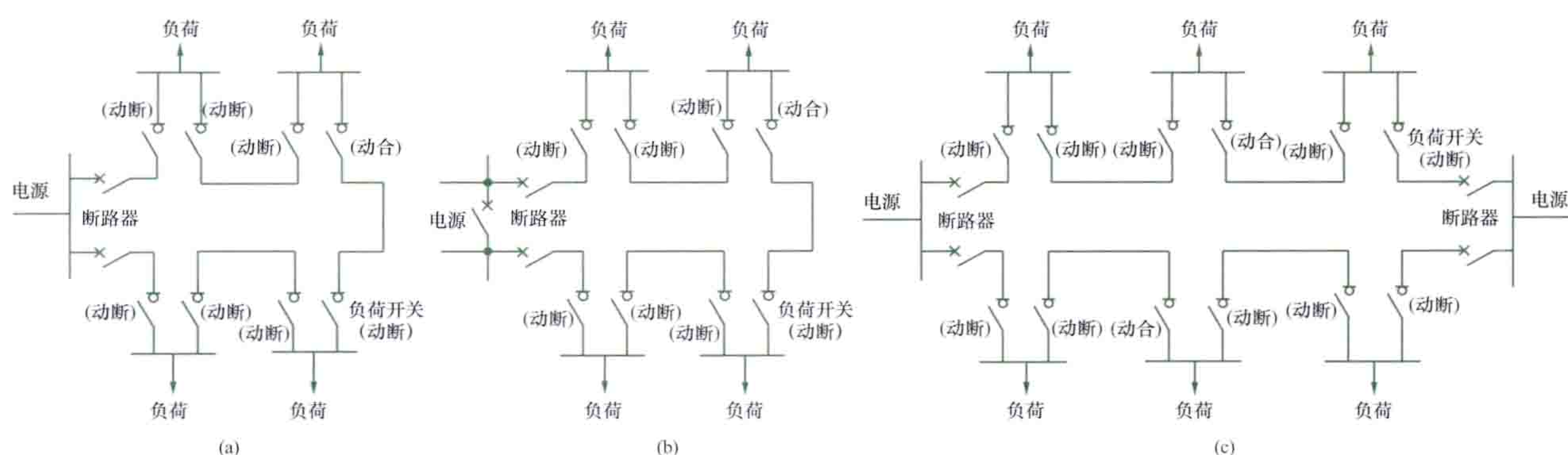


图 1　环形网络接线示意图

(a) 单电源环形网络；(b)、(c) 双电源环形网络

配电环网有架空线路和电缆线路两种形式。架空线路环网通常有三种典型接线方式：①单电源、多分段、单联络接线，如图 2（a）所示；②多电源、多分段、单联络接线，如图 2（b）所示；③多电源、多分段、多联络接线，如图 2（c）所示。单联络接线方式一般用于市郊，在市区或重要供电区则采用多电源、多分段、多联络接线方式。

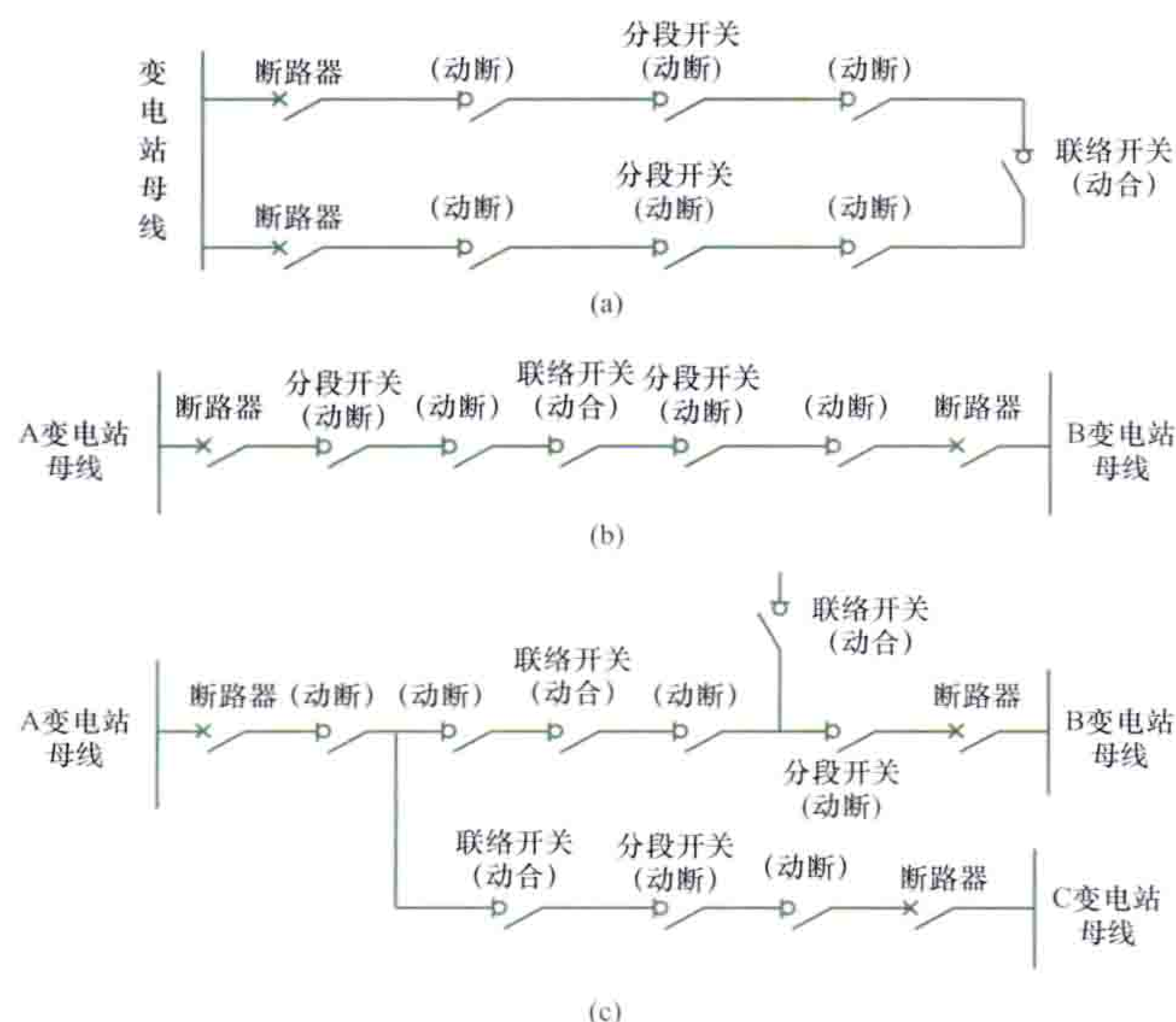


图 2　架空线路典型环形接线

(a) 单电源、多分段、单联络接线；(b) 多电源、多分段、单联络接线；(c) 多电源、多分段、多联络接线

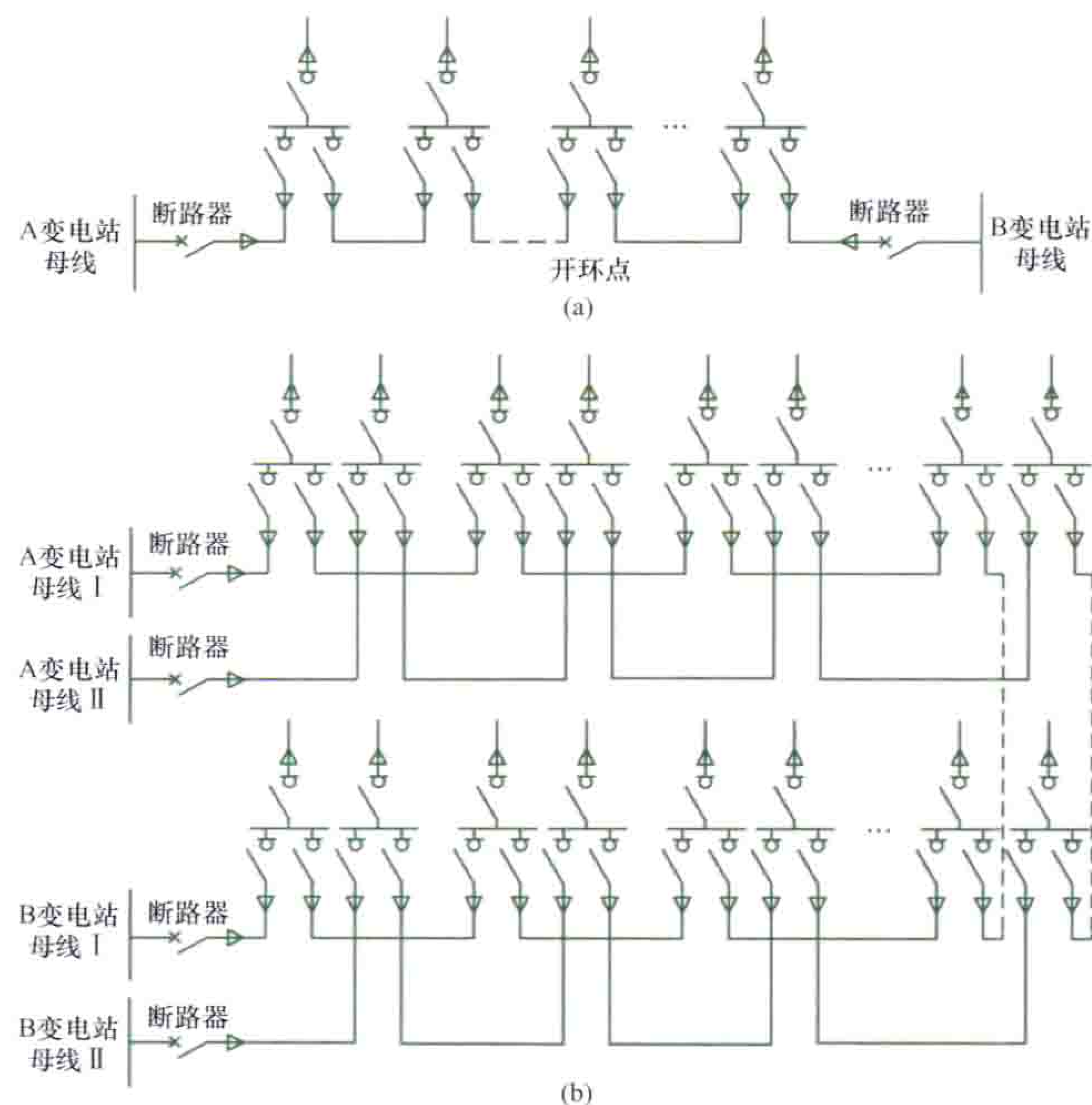


图 3　电缆环网典型接线方式

(a) 单环式；(b) 双环式

电缆环网的接线原理与架空线路环网相同，主要区别是分段器由专用的环网开关代替，以便于电缆的环入和环出。电缆环网的典型接线方式有单环式、双环式等，如图 3 所示。对于一些供电可靠性要求高的重要负荷，也可采用多电源环网接线，如图 4 所示的 N 供一备（$N\leqslant4$）接线方式。

单环网正常运行时，安排两端各送一半负荷；当检修或处理故障需要临时单侧供电时，导线可按其应急载流量考虑，但要求末端压降不能超过规定允许值。为了提高环网线路的载流量，中压配电环网还可采用 1/3 环网或 1/4 环网接线，如图 5 所示。正常运行情况下，1/3 环网接线的线路负载率可达 67%，预留线路容量的 1/3 作为备用。1/4 环网接线的线路负载率可达 75%，预留线路容量的1/4 作为备用。这两种接线方式适用于地区负荷比较稳定且接近饱和，按最终规模一次建成的配电网。其优点是供电可靠性与单环网接线相同，但线路负载率比单环网接线分别高 17% 和 25%；缺点是适应地区负荷变化的能力较差，且

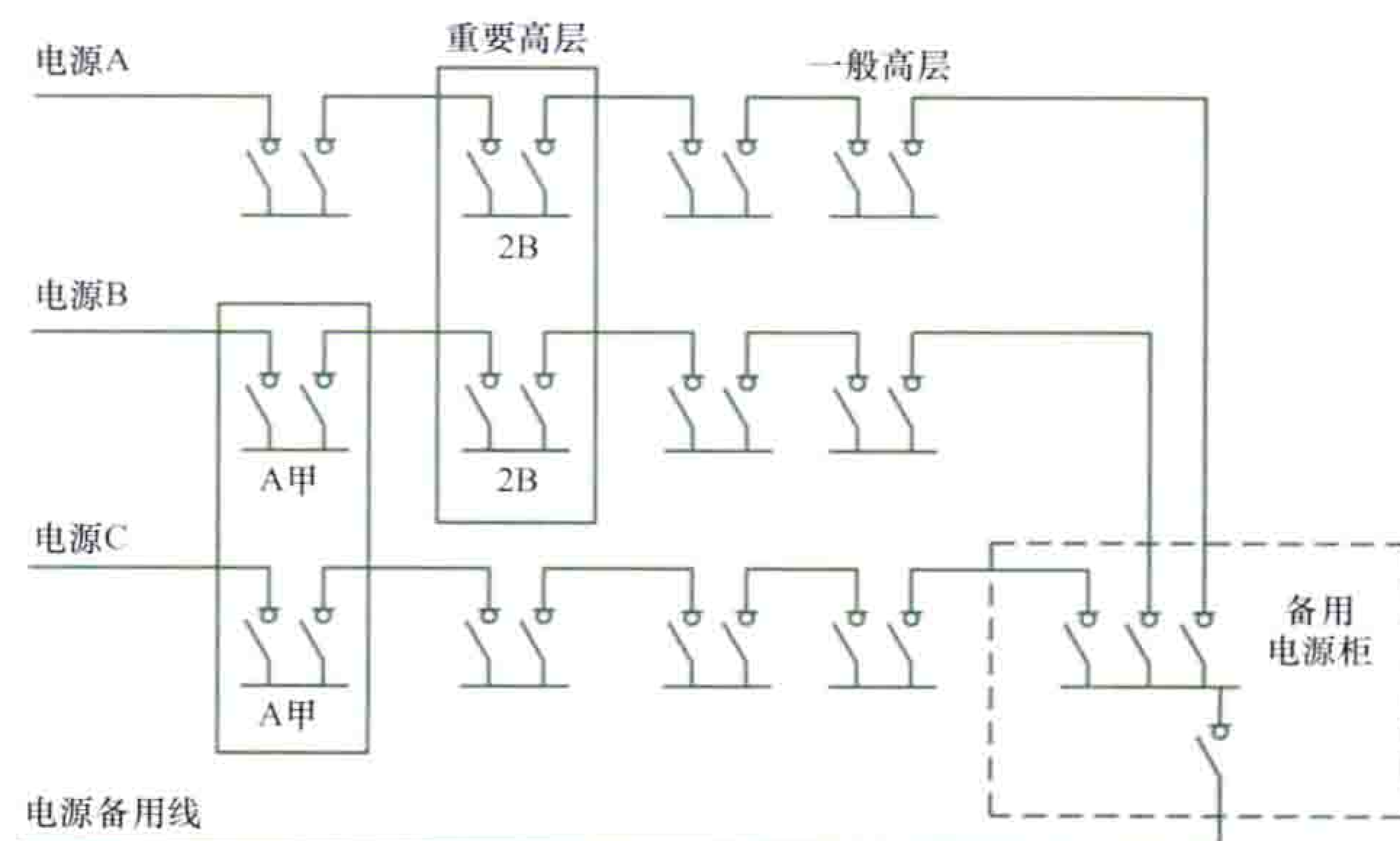


图 4　多电源 N 供一备（$N\leqslant4$）环网接线方式

调度操作比单环网接线复杂。

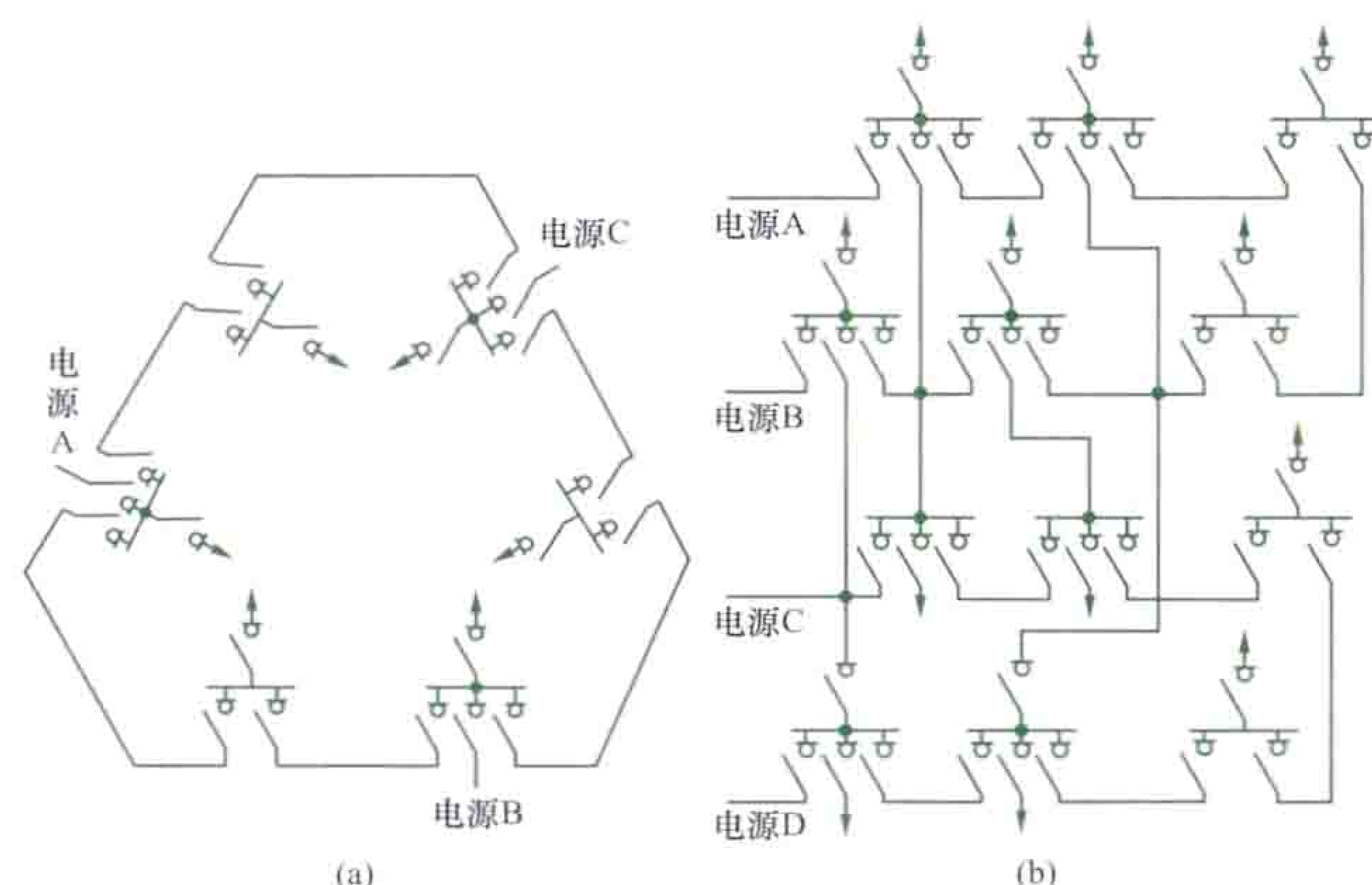


图5　1/3 和 1/4 环网接线方式

(a) 1/3 环网接线；(b) 1/4 环网接线

huiguang fangdian jiare

辉光放电加热　(glow discharge heating)　以低气压异常辉光放电作为热源和物理化学过程的激活剂而进行的电加热，又称离子加热。辉光放电产生的离子属于低温等离子体范畴。辉光放电是在真空条件下，用高压电场或灯丝电子发射等方法使工作气体电离而成，温度较低，一般不超过1000℃，主要用于材料的表面处理。

辉光放电加热的特点：①主要用于工件的表面处理；②工作温度较低，热处理后工件变形小，无需后续加工处理；③加热装置结构简单，制造成本低，使用与维护方便；④耗能较少，用水、用保护气体等都较少，节能效果显著；⑤加热装置均匀性差、冷却缓慢、产量较少等。

分类　有离子渗、离子溅射、离子蒸镀、离子刻蚀和离子注入等。

离子渗　用来在工件表面渗入氧、碳、硫、硼或进行碳氧共渗、硫氮共渗、碳氮氧共渗等，以提高工件的耐磨、耐蚀和抗疲劳性能，其中以离子渗氮用得最普遍。工作时，工件接阴极，炉壳等接阳极，先抽真空，然后送入氨或氨氮混合气体，在400～1000V电压下，炉内气体辉光放电，产生等离子体。其中的氮正离子轰击工件使其温度升高，同时进入工件表面并向内部扩散形成渗氮层。离子渗碳在真空离子渗碳炉内进行，送入的是甲烷等，电离后得到碳离子，须在电阻加热辅助下进行。渗其他元素或多元素共渗情况类似。

离子溅射　分阳极溅射和阴极溅射两种。工作气体主要用氩气。

阳极溅射用于离子镀膜。工作时，工件接阳极，成膜物质接阴极。氩电离成等离子体后，氩离子经高压（1～4kV）电场加速，轰击阴极，使成膜物质以分子状态溅射并沉积在工件表面。也可以进行反应溅射，即将反应气体（O_2、N_2、H_2S、CH_4等）加入氩中，反应气体及其离子与工件原子和溅射原子发生反应生成化合物，沉积在工件表面。阳极溅射主要用于电子工业（如在半导体基片上镀膜）和机械工业（如在工件表面镀TiC、WC等耐磨层）。

阴极溅射主要用于电子工业，用来对半导体基片表面进行清洗、抛光、磨削、减薄等。工作时，基片接阴极，工件接阳极，氩离子轰击基片表面，起到清洗等作用。

离子蒸镀　真空蒸发和阴极溅射技术的结合。工作时，工件接阴极，成膜物质接阳极，成膜物质用其他热源（如电阻、电子束等）加热，所产生的蒸气电离成等离子体。其正离子经高压（1～5kV）电场加速轰击工件并沉积在工件表面。氩正离子有清洗工件表面的作用，可使膜层附着力大为提高。

离子刻蚀　工作原理与阴极溅射类似，但更精细，设备更复杂。工作气体通常用氩气。由于氩离子直径只有零点几纳米，可以认为刻蚀是对逐个原子的剥离，剥离速度约每秒一层到几十层，是一种纳米级加工工艺，可用来刻蚀出分辨率极高的图形，刻蚀精度是任何其他加工方法都无法达到的。离子刻蚀用于集成电路、声表面波器件、超导器件、光集成器件等微电子器件的高精度刻蚀。

离子注入　正离子经高压（10～800kV）加速，“打进”接阴极的工件内（注入深度一般在1μm以内）。在电子工业中用于半导体渗入，在机械工业中用来把选定的原子（He、N、C、B、Al、Ti、Cr、Ni、Co、Mo等）注入机械零件表面以提高其机械性能。

装置构成　主要有辉光离子氮化炉、辉光离子渗碳炉、真空离子化学热处理炉等。

辉光离子氮化炉　一种特殊形式的真空电炉，一般情况下炉内是没有电热元件的，仅利用辉光放电实现氮化。

在真空炉内，工件作阴极，炉壁为阳极，工作时将真空度控制在1.3×10^2～1.3×10^3Pa后通入含氮气、氨气或氮与氢的混合气等。在阴阳极间加以高压直流电场，使气体电离，并以极高速度撞击工件表面，使其产生辉光。由于能量的转换，使工件被加热到所需要的温度，同时在工件表面上夺取电子，使工件表面形成氮化层。

辉光离子氮化炉有立式和卧式，最常见的是立式钟罩型和井式两种。辉光离子氮化工艺与普通氮化工艺相比，具有生产周期短、可以很好地控制渗层组织、变形少、能实现局部氮化等优点。

由于辉光离子氮化炉具有上述特点，对于碳钢、合金钢、不锈钢、球磨铸铁、高速钢和有色金属等均可进行离子氮化处理。其广泛应用于机床、轻工机械、纺织机械、石油机械、动力机械等行业中要求高硬度、耐疲劳、耐腐蚀的高精度零件，包括曲轴、缸套、模具、齿轮、各种刀具等。

真空离子渗碳炉　将工件置于真空中加热，待温度接近渗碳温度时，向炉内充入数百帕的C_3H_8等气体，同时在阴极和阳极间外加直流高压电，使其辉光放电并由此产生碳离子，利用工件周围的急剧变化的电位梯度来加速，使碳离子向工件表面冲击进而实现渗碳。真空离子渗碳的渗碳速度快，是一般渗碳时间的50%左右；渗碳层可通过调节放电时间和通入气体的流量加以控制；供气量很少，不易产生炭黑；工件表面渗层均匀，连微孔、细缝等狭小部位都可以很好地渗碳。这是一般的真空渗碳炉无法比拟的。

真空离子化学热处理炉　炉体结构多为罩式结构，主要组成有炉壳、阴极、阳极、加热体、隔热保温屏、观察窗、测温热电偶、供气系统等。电源部分则配备一套输出电压为0～1000V的直流电源装置以及相应的控制和保护装置。

真空离子化学热处理与一般的真空化学热处理相比，其优点包括：①由于离子轰击的能量作用，外来原子的活性提高，在工件表面附着和形成化合物的温度较低，减少了工件的热变形和工件基体与表层化合物组织由于温度高而转变为有害组织结构的可能性；②电离的正离子轰击工件后附着在工件表面，此过程中由于电场能量的驱动作用，附着速率和形成化合物的速度大大提高，因此处理周期短，生产效率高；③由于离子的轰击作用，进一步地清洁和净化了工件表面，随后形成的渗层或化合物层与工件基体的结合更牢固，过渡层之间的夹杂极少，组织形态更优，产品的性能更高。未来其应用将向离子喷镀、离子烧结、离子多用炉等方向发展。

hunhe zhaoming

混合照明 (mixed lighting) 由一般照明与局部照明组成的照明（见照明分类）。用于部分作业面照度要求较高，只采用一般照明不合理的场所。

中国规定，当一般照明或分区一般照明不能满足要求时，应增设局部照明。某些小范围内要求较高的照度，室内工作位置的密度不大，为了节约能源宜采用混合照明。有的场所需要改变光的方向，辨认视看对象的形状和质地时，应采用混合照明。

当工作地点附近因生产条件限制无法固定局部照明器时，不能采用混合照明；在室内工作位置密度很大采用混合照明不合理时，宜单独设置一般照明而不用混合照明，但是所有的工作场所不应只设局部照明。

有些场所单独使用一般照明达到很高的照度虽然是可能的，但耗电量指标很高，采用混合照明可降低耗电量，出于经济的考虑，此时推荐使用混合照明，如设计室、绘图工作室等。

混合照明中局部照明与一般照明的照度数值应有一定的比例。一般照明照度不应低于混合照明照度的10%，如果一般照明照度过低，视觉工作区与周边环境亮度比过大，也会影响视觉工作。因此，照度标准规定：一般照明的照度不宜低于30lx，对高压气体放电灯不宜低于50lx。



jichuang diankong xitong

机床电控系统 （electric drive control system for machine tool） 控制机床的电动机起动、制动、正反转、调速等的电力拖动和控制电路组合的整体。机床电控系统（见图）通过对电动机的调速，可以实现机床的无级拖动。

分类 根据驱动电动机的位置，可以分为主轴电动机电控系统和辅助电动机电控系统两类。根据驱动电动机的类型，可以分为直流电动机电控系统和交流电动机电控系统两类。交流电动机电控系统又包括笼型感应电动机电控系统和永磁同步电动机电控系统等。根据机床上电动机的数量，机床电控系统可以分为单电动机拖动和多电动机拖动系统。单电动机拖动一般用于中小型机床，用一台电动机来拖动机床的主轴，机床上其他部件的拖动则通过传动机构来完成，或者通过其他非电动机拖动方式来实现。多电动机拖动系统中，除了主轴电动机外，还有多台电动机分别驱动机床的各工作部件，如采用进给电动机控制工件的位置，一方面减少了传动机构，提高了效率，另一方面也可以实现机床各运动部件的自动化，提高机床整体的自动化程度。重型机床、组合机床、数控机床、自动线等都采用多电动机拖动的方式。

性能要求 机床的主轴电动机，除了带动工件高速旋转外，还要承受径向、轴向、切向的切削力，机床的主轴电动机需要在弯曲、扭转的交变载荷下，按照要求进行起动、增速、减速和停车等。因此主轴电动机电控系统需要有比较高的控制精度，包括转速、转矩精度等（见转速控制、转矩控制）。由于主轴的旋转速度要求很高，所以采用直接拖动的电控系统中，电动机需要运行在较高的转速区域，也称为高速主轴电控系统。高速主轴电控系统是高速机床的核心部件。

机床上的进给电动机等辅助电控系统，要控制工件的位置，所以需要有较高的位置和转速控制精度。（见位置控制、转速控制）

发展 直流电动机转矩易于控制，具有良好的起制动性能，因此在早期的机床电控系统中，一直采用直流电动机电控系统。随着电力电子技术、自动控制技术和微处理器技术的发展，交流电动机电控系统得到了越来越广泛的应用。

直流电动机电控系统最早采用继电器控制。为了控制电动机的起动电流，采用延时继电器在电枢绕组上串入电阻器，在起动过程中延时继电器逐渐旁路掉串联电阻，实现正常起动（见直流电动机电枢串电阻调速）。随着电力电子器件的发展，采用电力电子变换器控制的直流电动机电控系统已经替代了传统的继电器控制模式（见晶闸管相位控制直流调速）。



机床电控系统

随着可关断型电力电子器件的出现，采用电力电子变换器驱动的交流电动机电控系统逐步成为机床电控系统中的主流。电动机可以采用笼型感应电动机和永磁同步电动机。（见交流电动机调速、交流电动机矢量控制）

jiben dianfei

基本电费 （basic charges） 用户补偿电力生产中固定成本部分的电费。电力生产成本分为固定成本和变动成本两部分，其中固定成本是不随发供电量多少而变动的成本，如固定资产的维护、折旧等；变动成本是随发供电量变化而变化的成本，如消耗的发电燃料费用等。因此，向用户收取的电费也相应分为基本电费和电度电费两个部分，分别补偿固定成本和变动成本的支出，这是世界各国计算较大电力用户电费的通用办法，也称两部制计费方式或两部制电价。基本电费是用户不论实际是否使用电能都需要承担的电费，它有利于用户公平合理地负担发供电成本，促使用户提高用电负荷率，从而降低发供电成本和总电价水平。

基本电费的计算比较复杂，一般都是按月计收，以用电容量或用电最大需量为计算因子。在中国，基本电费的执行范围、计费方式、取费标准等由国家发展和改革委员会确定。

执行范围 长期以来，中国对受电变压器总容量（含不通过变压器接用的高压电动机容量）在315kV·A（kW）及以上的工业生产用电实行两部制电价，计收基本电费。2005年，国家发展和改革委员会颁布了《销售电价管理暂行办法》，扩大了实施两部制电价计费方式的范围，工商业及其他用户中受电变压器容量在100kV·A或用电设备装接容量在100kW及以上的用户都需计收基本电费。

计费方式 基本电费的计费方式有按用电容量计算和按用电最大需量计算两种。①按用电容量还是按用电最大需量计算，一般由用户根据其负荷特性及生产情况每年进行选择并以供用电合同的方式明确。②遇有用户新装、增容、变更用电或事故停电、检修停电、计划限电的，按《供电营业规则》的规定进行相应计算。

按用电容量计算 也称按变压器容量计算，即按供用电

合同约定的用电容量乘以相应的费率标准计算基本电费，与每月抄记的最大需量无关。对低压供电的用户，用电容量是每台用电设备的额定容量之和；对高压供电用户，用电容量是受电变压器额定容量之和加上不经变压器直接接入电网用电的高压电动机额定容量之和。

按用电最大需量计算　也称按最大需量计算，即按供用电合同约定的最大需量值（也称合同最大需量值或核定最大需量值）乘以相应的取费标准计算基本电费。约定最大需量值时，高压供电的用户不低于变压器容量的40%，低压供电的用户不低于50kW。用户可根据实际情况，提前半个月申请变更下一个月的合同最大需量值，但申请变更合同最大需量值的时间间隔不得少于6个月。《销售电价管理暂行办法》对按最大需量计算基本电费的方法进行了细化和调整：实际抄录的最大需量不超过核定值的5%时，按照核定值乘以相应取费标准计收基本电费；实际抄录的最大需量超过核定值的5%的，超过5%的部分加一倍收取。

取费标准　由国家发展和改革委员会在对各省批复的销售电价执行文件中确定。

jiguang-dianhu fuhehan

激光-电弧复合焊 (laser-arc hybrid welding)

一种将激光和电弧同时作为热源的焊接方法。激光-电弧复合焊的热源是一种全新的高效复合热源，其特点是充分发挥了激光和电弧两种热源各自的优势，又相互弥补了各自的不足。该方法可以进行不同材料，如低碳钢、高碳钢、不锈钢、铝及铝合金以及Ni基合金等的对接、角接、环形焊缝的焊接，广泛应用于航空、航天、航海、汽车、石油化工等工业领域。

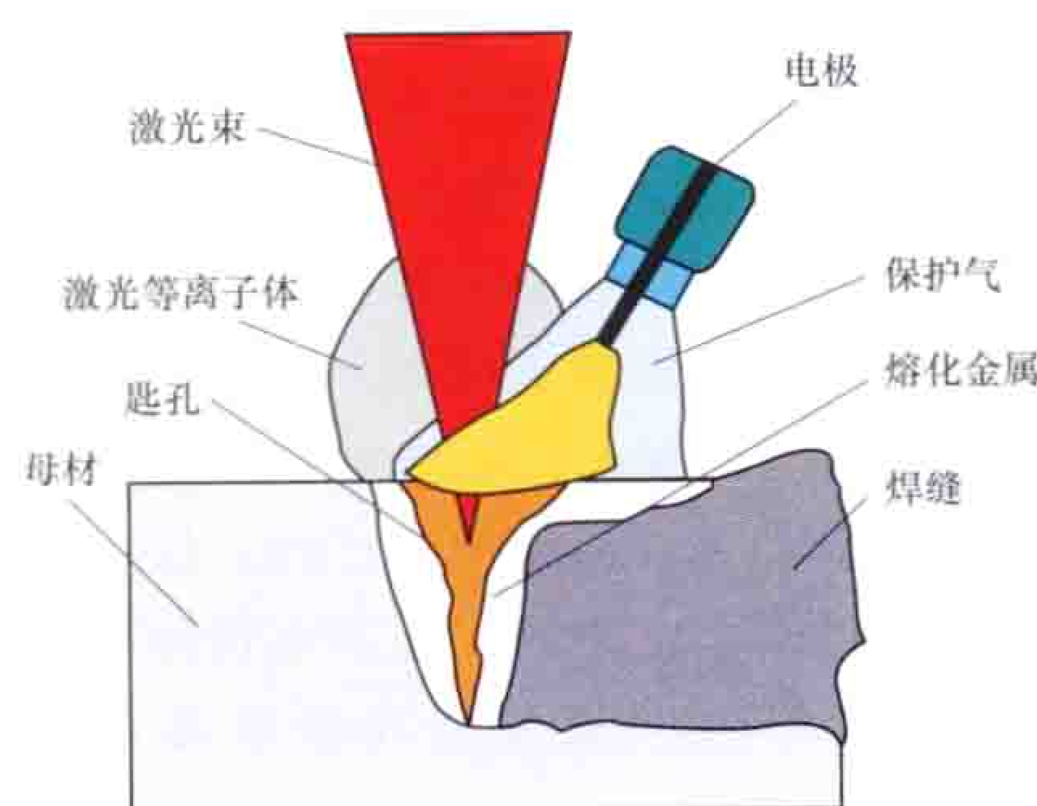


图1　激光-电弧复合焊原理

激光-电弧复合焊的基本原理如图1所示。电弧热源和激光热源同时作用于一个加工位置上，焊接电弧和激光束同时移动，利用电弧焊保证熔宽，利用激光焊增加熔深。该方法克服了激光焊接对焊接装配精度和间隙要求高，焊缝易出现气孔、裂缝和咬边等缺陷，以及激光能量转换效率低的缺点。图2所示为3种焊接条件下的焊接熔深对比，可以看出，复合热源的焊缝具有很好的焊缝熔深和深宽比。

激光-电弧复合焊的复合形式众多，分类方法也不尽相同。根据电弧热源种类可以分为激光-TIG（氩弧焊）复合焊、激光-MIG（熔化极惰性气体保护焊）复合焊、激光-MAG（熔化极混合气体保护焊）复合焊、激光-等离子体弧复合焊等。根据激光功率的大小和与之复合的电弧焊种类可以分为：①百瓦级激光-电弧复合焊。热源表现为电弧的特性，激光功率比较小（≤500W），激光主要起稳定和压缩电弧、提高电弧能量利用率的作用，多用于激光-TIG复合焊，比较适合薄板焊接。②千瓦级激光-电弧复合焊。热源兼有激光和电弧的特性，能够充分利用二者的优点，多用于激光-MIG复合焊和激光-MAG复合焊，适用于铝合金、镁合金、碳钢、低合金高强钢、超高强钢等材料的焊接。③万瓦级激光-电弧复合焊。热源表现为激光的特点，具有较大的焊缝深宽比，大多采用大功率的CO_2激光与MAG焊的复合，主要用于船板等大厚板的焊接，设备投资较大。

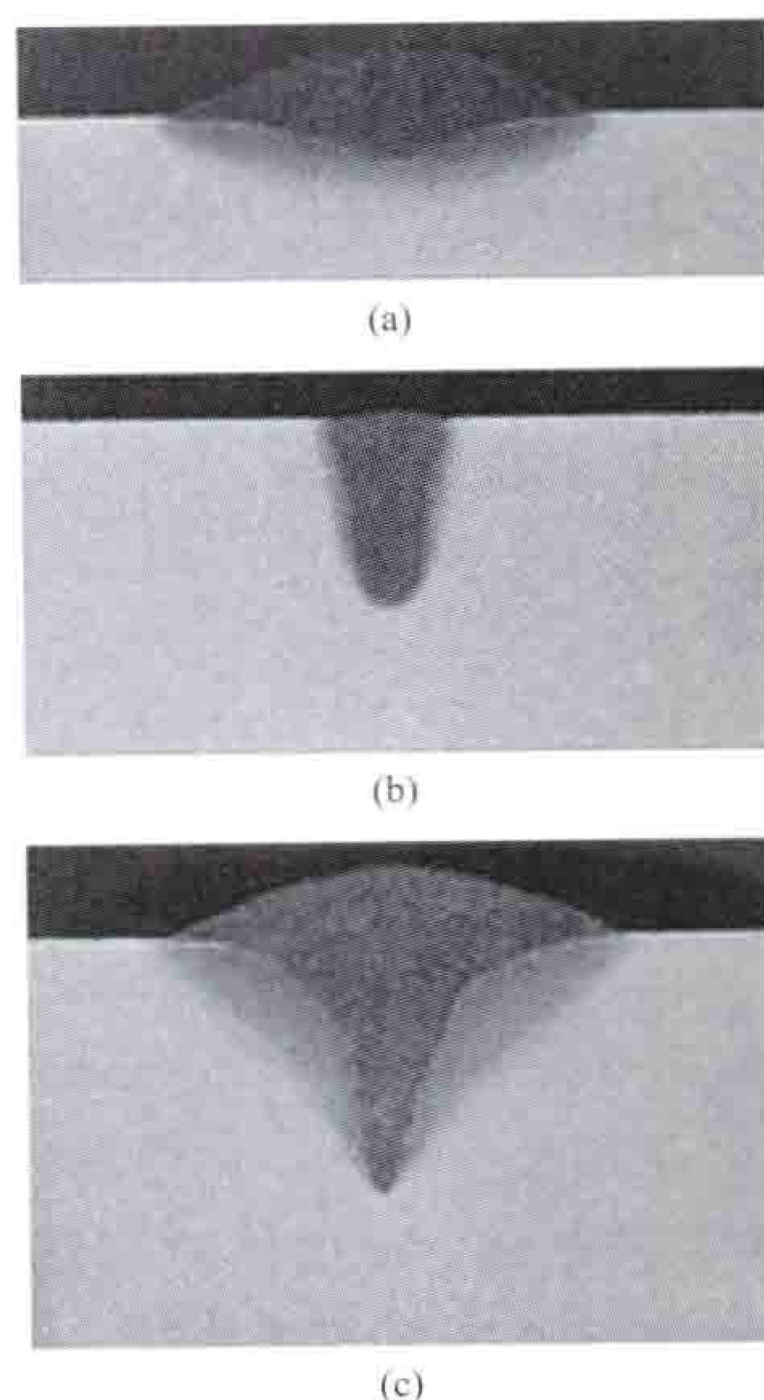


图2　激光-电弧复合焊熔深对比图
(a) 电弧焊熔深；
(b) 激光焊熔深；
(c) 激光-电弧复合焊熔深

激光-电弧复合焊的优点：①焊接能量集中，焊接速度快，熔深比单独使用激光焊或电弧焊都大，可以达到普通电弧焊的2～5倍；②电弧过程稳定，即使是在小电流条件下，如15A的情况下也能稳定焊接；③对焊接间隙要求低，可以进行开坡口焊接；④焊接变形小于普通电弧焊。

jiguanghan

激光焊 (laser beam welding)

以聚焦的高能量密度的激光作为热源对金属进行熔化形成焊接接头的一种焊接方法。激光焊可用于焊接碳钢，低合金钢，不锈钢，高温合金，铝、镁、钛、镍等有色金属及其合金，还可用于异种金属，如钨与镍、不锈钢与钽等，以及某些非金属材料，如陶瓷、石英、玻璃塑料等的焊接。

激光（见激光加热）是利用辐射激光放大原理产生的一种单色、方向性强、光亮度大的光束，经透射或反射镜聚焦后功率密度可达10^{13} W/m^2。激光束在横断面上的功率密度分布情况称为激光模式（TEM），通常有单阶模与多阶模之分。CO_2激光器的几种低阶模光斑花样如图1所示。激光模式与光束的聚焦特性密切相关，模式越低，聚焦后的光点越小，功率密度越大。焊接一般要求激光器输出单阶模。多阶模适合于堆焊、合金化和热处理。

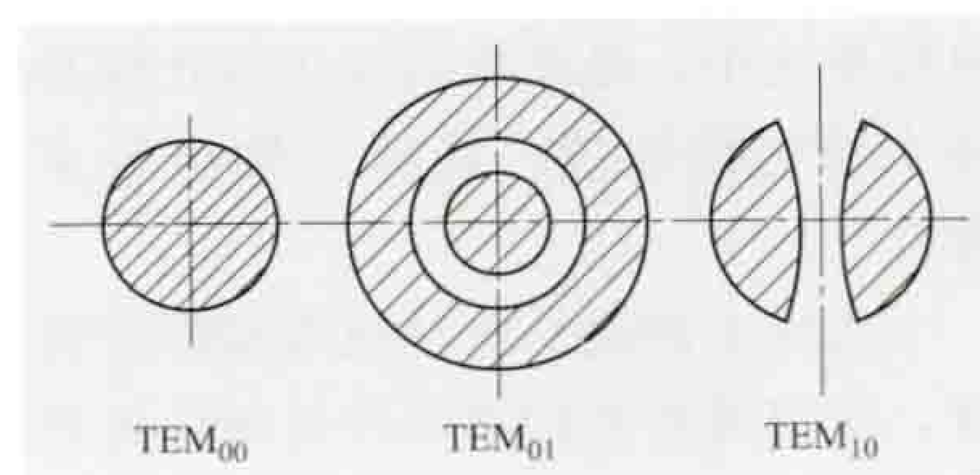


图1　CO_2激光器的几种低阶模光斑花样

激光焊接设备主要由激光器、光学偏转聚焦系统、光束检测仪、工作台（或专用焊机）和控制系统组成，如图2所示。用于焊接的激光器主要分为固体激光器和气体激光器两类。固体激光器有红宝石激光器、钕玻璃激光器和YAG激光器（钇铝石榴激光器）。气体激光器主要是CO_2气体激光器。

特点 激光焊的特点：①聚焦后的激光具有很高的功率密度（约 10^{13} W/m²），焊接以深熔方式进行；②激光可通过光导纤维棱镜等光学方法弯曲、偏转、聚焦，特别适合于微型零件及可达性很差部位的焊接；③激光在空间传输过程中能量衰减很小，可以穿过玻璃等透明体，适合于在玻璃制作的密封容器里焊接铍合金等剧毒材料；④激光不受电磁场影响，不产生 X 射线，不需要真空保护；⑤加热范围小，热影响区小，焊接残余应力和变形小，适合于某些对热输入敏感材料的焊接；⑥可以焊接一般焊接方法难以焊接的材料，如高熔点金属等，甚至可用于焊接非金属材料，如陶瓷、有机玻璃等；⑦一台激光器可供多个工作台进行不同的工作，既可以用于焊接，又可以用于切割、合金化和热处理。

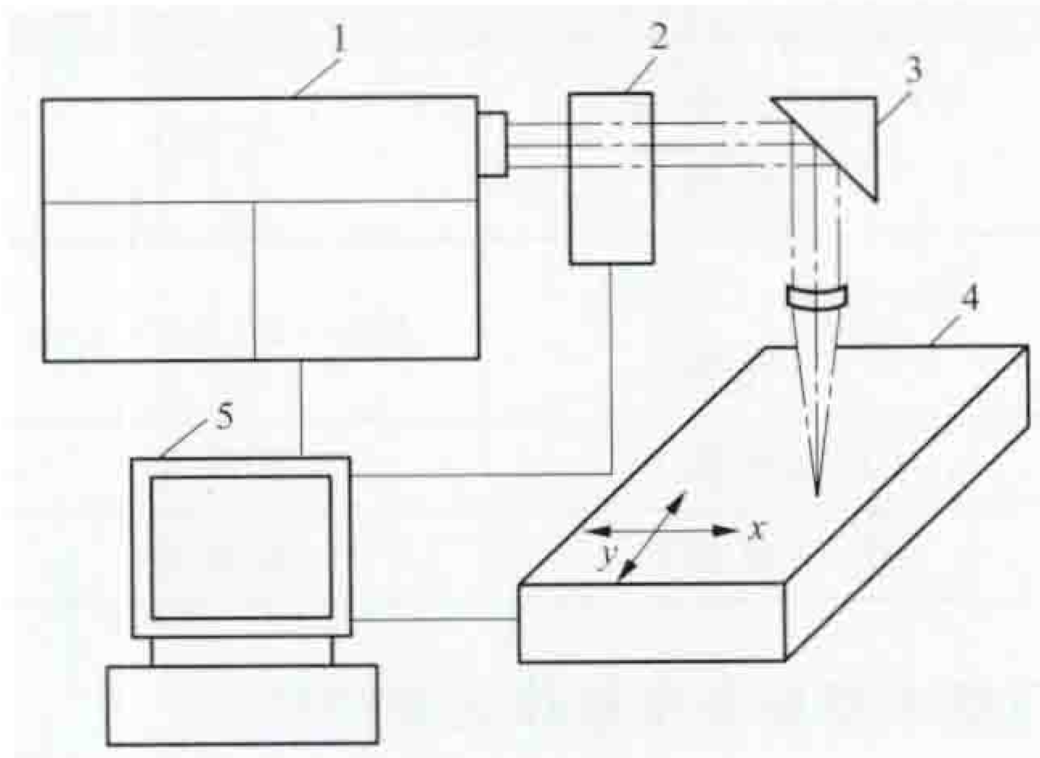


图 2 激光焊接设备构成简图

1—激光器；2—光束检测仪；3—偏转聚焦系统；4—工作台；5—控制系统

分类 激光焊按激光产生方式分为脉冲激光焊和连续激光焊（包括高频脉冲连续激光焊）两类。脉冲激光焊类似于点焊，每个激光脉冲在焊件上形成一个圆形焊点。连续激光焊在焊接过程中形成一条连续的焊缝。根据聚焦后光斑上功率密度的不同，激光焊又可分为热导焊和深熔焊两种。

脉冲激光焊 通常采用固体激光器。适合用于 ϕ0.5mm 以下金属丝与丝、丝与板或薄膜之间的点焊，特别是微米细丝的点焊，最细可焊 ϕ0.02～0.2μm 细丝。主要应用于集成电路内引线（硅片上 1.8μm 厚铝镀膜和 50μm 厚、100μm 宽铝箔焊接）、微型薄膜电路元件中导线（镀在微晶玻璃或普通玻璃衬底上厚 0.3～1μm 的铜、铝金属膜和 ϕ30～80μm 铜、镍丝焊接）及航天微型仪表、传感器等元件的制造。

连续激光焊 通常采用 CO_2 激光器。主要用于钢铁、汽车、机械、飞机测试设备和一些压力容器、真空容器等的焊接，可焊接的材料有低碳钢、中碳钢、低合金钢、不锈钢、铜合金、钛合金等。

热导焊 在激光光斑上功率密度不高（$<10^9$ W/m²）的情况下，金属材料表面在加热时不会超过沸点，所吸收的激光能转化为热能后通过热传导将工件熔化，其熔深轮廓近似半球形。它的传热熔化焊接过程类似于非熔化极氩弧焊。

深熔焊 在激光光斑上的功率密度足够大（$\geq 10^{10}$ W/m²）时，金属在激光的照射下被迅速加热，其表面温度在极短的时间内升高到沸点，金属发生汽化。金属蒸气以一定的速度离开熔化表面，产生一个反冲压力作用于熔化的金属，在激光光斑下产生一个小凹坑。激光可直接射入坑底形成一个细小的“小孔”。当金属蒸气的反冲压力与液体表面张力和重力平衡后，小孔不再继续深入。光斑功率密度很大时，小孔可贯穿整个板厚，形成穿透性焊缝（或焊点）。

jiguang jiare

激光加热 (laser heating)

利用激光能量对物料进行的电加热。当激光束照射在被加热工件表面时，工件吸收激光束的能量并将其转变为热能，从而被加热。激光加热的优点：①功率密度高，可达 10^8～10^9 W/cm²，几乎可加热所有材料，包括各种高熔点和高硬度材料；②加热速度快，加热可局限在很小范围，因此热影响小、工件变形小；③根据需要可在大气、真空和各种气氛中加热，或透过透明材料加热；④可方便地把激光从一个工位向另一个工位输送，也可把单束光分成几束功率较小的光使用；⑤光束调制方便，易于实现计算机数控和自动化操作，实现精密加工；⑥加工时，无工具磨损、无机械接触。激光加热的缺点：①设备昂贵，电-光能量转换效率低（一般只约 1%，大功率二氧化碳气体激光器能到 10%～15%）；②激光会伤害人的眼睛、皮肤，大功率激光会损坏仪器设备，甚至引起火灾，须加以防范。

激光 一种电磁波，由激光器产生。激光器中有一种激光工作物质（又称激活媒质），其特殊性能：当它在一定条件下受到外界能量（对激光加热为电能）的激励时，它的大多数粒子会从某一个低能级 E_1 跃迁到相邻的较高能级 E_2。激光器的一端有一块全反射镜，另一端有一块部分反射镜，两者与激光工作物质构成一个谐振腔。处于 E_2 能级的一些粒子会因自发辐射跃迁回 E_1 能级，同时放出能量等于 E_2-E_1 的光子。这些光子入射到其他粒子上又可因受激辐射引发出其他的光子。这些光子中，凡其方向不与激光器轴线垂直的，很快都逸出激光器；与激光器轴线平行的光子，则由于两端反射镜的反射而在激光工作物质内部来回运动，并在入射到处于 E_2 能级的粒子时又会产生新的同样的（包括方向相同的）光子。愈来愈多的粒子从能级 E_2 跃迁回 E_1，所产生的同样的光子也愈来愈多（这个过程叫光放大），光束不断增强，最后有一部分光子从部分反射镜一端输出，这就是激光。

激光的特点：①单色性好；②相干性好，即方向、频率、振幅、偏振态、相位的相同程度高；③发散角小；④强度（亮度）高。因此，激光在许多技术领域中得到应用，如用于测量、通信、瞄准、照排、信息存储、全息摄影等，而激光加热主要利用其后两个特点。

装置构成 通常由激光器、导光和聚焦系统、加工机床、计算机数控系统以及必要的配套系统（如供气、观察、测量等系统）和防护设备等组成。典型的激光器由激光工作物质、光学谐振腔、电源和真空系统等组成。用于激光加热的激光器主要有二氧化碳气体激光器和固体激光器，见图 1。激光加热常用激光器性能见表。

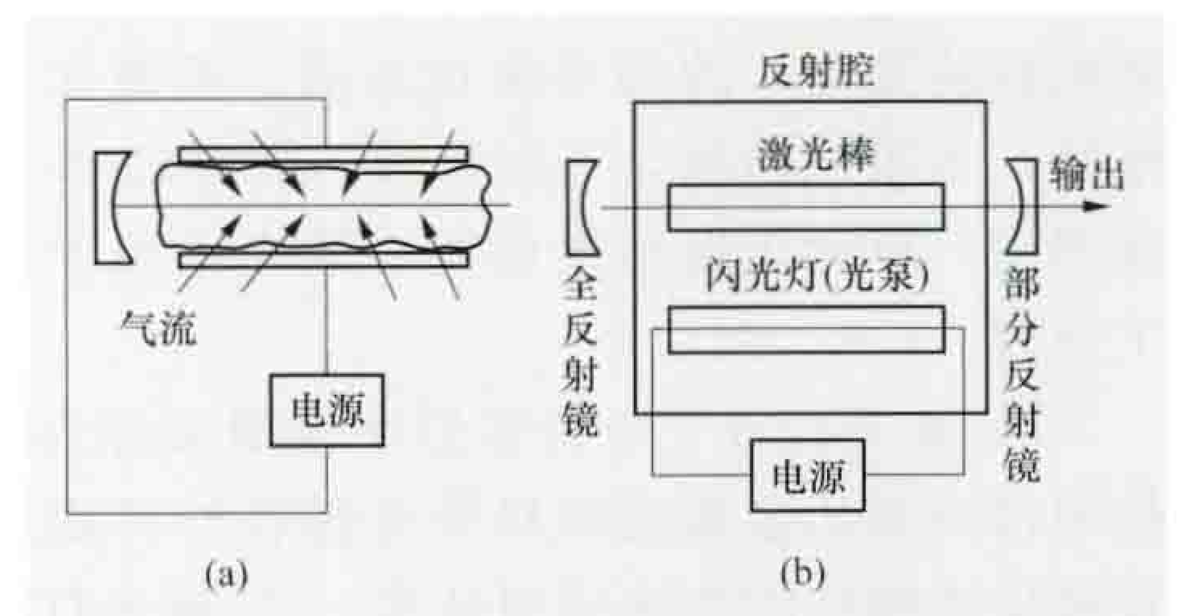


图 1 激光加热常用激光器示意图

(a) 二氧化碳气体激光器；(b) 固体激光器

应用 主要应用有激光焊接，激光热处理，激光钻孔、切割和刻蚀，3D 激光打印以及激光

激光加热常用激光器性能

激光器类型		激光波长（μm）	工作方式	功率输出（W）	脉冲频率（Hz）	脉冲宽度（m）
二氧化碳气体激光器		10.6	连续或重复脉冲	$50\sim10^4$（平均） 10^7（峰值）	≤100	0.01～0.1
固体激光器	钇铝石榴石激光器	1.06	连续或重复脉冲	$10\sim10^3$（平均） 10^4（峰值）	200～25 000 以上	$2\times10^{-4}\sim10$
	钕玻璃激光器	1.06	普通脉冲	10^5（峰值）	单脉冲	0.5～10
	红宝石激光器	0.694 3	普通脉冲	10^5（峰值）	单脉冲	0.2～5

治疗等，其主要区别在于所加的激光能量密度不同。它的应用领域类似电子束加热，但更精细、更广泛，特别在小功率领域有明显的优势。

激光焊接　以聚焦的高能量密度的激光作为热源对金属进行焊接加工，功率密度约 10^{13} W/m²。（见激光焊）

激光热处理　功率密度为 $10^3\sim10^4$ W/cm²、束径约 2mm 的激光在金属表面以一定速度（一般高于 2mm/s）扫描时，由金属的快速加热和随后的快速自行冷却可在表面上获得厚 0.3mm 的淬硬层带。提高功率密度并降低扫描速度，可使金属表面熔化，自行冷却凝固后可获得极细的硬化层组织，显著改善金属表面的耐磨性，如在金属表面涂敷硬质合金粉末，可实现表面合金化。激光表面热处理已成功应用于汽油、柴油发动机的汽缸和液压缸等。通常用二氧化碳气体连续激光器进行激光热处理。

激光钻孔、切割和刻蚀　利用功率密度为 $10^5\sim10^6$ W/cm² 的激光照射工作表面，可使材料迅速汽化，实现对工件的钻孔、切割和刻蚀。

激光钻孔主要用于钻直径小于 1mm 的孔（最小可到 1μm），已用于金刚石拉丝模、钟表宝石轴承、化学纤维硬质合金喷丝板、火箭发动机和柴油机的燃烧喷嘴、涡轮叶片等。可用连续和脉冲激光器，以后者较好。

激光切割可用于任何材料，与气割、电弧切割、等离子切割相比，优点是切口窄（0.1～0.5mm）、尺寸精确、切口光洁。早期主要用于 12mm 以下不锈钢板和钛合金的切割、难熔金属和贵重金属的精密切割、半导体材料（如硅片）的划片等。20 世纪末在机械、造船、轻工等工业部门也得到应用，如在造船和汽车制造业中用来切割壳体钢板，在木材加工业中用来切割胶合板，在服装行业中用来大量裁剪衣料等，一般用 $10^2\sim10^4$ W 级二氧化碳连续激光器。工作时通常沿激光束向切割点喷射气体，以提高切割效率，改善切口质量。

激光刻蚀用于在工件上划线、刻标记、去除多余的材料等。后者用于诸如电阻器、电容器等电子元件电参数的微调，乐器簧片调谐、旋转体（涡轮机叶轮、陀螺仪、微电机和钟摆等）的动平衡校正等。用激光制造大规模集成电路，不用抗蚀剂，工序简单，能刻蚀 0.5μm 以下的高精度图案，可大大提高集成度。激光还用于柔性线路板的加工处理。

3D 激光打印　一种以数字模型文件为基础，利用激光作用将粉末状金属或塑料等可黏合材料逐层打印出来从而直接构造物件的快速成型技术。3D 激光打印具有生产物件无需模具或机械加工、生产周期短、生产率高等优点。中国的激光成型钛合金 3D 打印技术世界领先，已用来制造飞机大型钛合金整体关键构件。

激光治疗　激光在医疗中用于切除、修补或烧除病变组织，如切除癌肿、面部血管瘤，修复脱落的视网膜等。用激光进行手术的优点：①手术精确度高、操作方便、时间短；②出血少；③能使病变组织细胞（如癌细胞）顷刻凝固、坏死，甚至炭化、汽化，并能迅速封闭病变组织内及其边缘的血管和淋巴管，从而防止病变转移；④可借助光导纤维在体内进行手术；⑤无器械接触，可减少医源性感染；⑥对正常组织损伤轻微，对病人的全身功能和免疫功能影响很小等。所用激光器除二氧化碳气体激光器和掺钕钇铝石榴石激光器外，氩激光器（波长 0.488、0.515μm）用于眼底凝固设备已得到普及。

历史与发展　早在 1917 年，A. 爱因斯坦（Albert Einstein，1879—1956，见图 2）在研究黑体辐射定律时就提出受激辐射的假设。1960 年，美国人 T.H. 梅曼（Theodore Harold Maiman）制成第一台红宝石激光器，同年美国人 A. 贾万（A. Javan）制成了波长为 1.15μm 的氦氖激光器。1961 年首次把红宝石激光器用于钻孔。1964 年钇铝石榴石激光器和二氧化碳气体激光器相继得到开发。同年，激光焊得到实际应用。二氧化碳气体激光器的输出功率，1966 年达 1000W，1968 年达 60kW，使激光加热的应用迅速扩大。20 世纪 80 年代，连续输出达 10kW 的 CO_2 激光器和连续输出 2kW 级的钇铝石榴石激光器已商品化。90 年代以来，随着电子、汽车、造船、航天、原子能等工业与高新技术产业的迅猛发展，激光加热技术与装置的发展取得了惊人的进步。CO_2 激光器和 YAG 激光器在功率输出与光束状态的稳定性方面实现了大的飞跃，能够 24h 连续工作的激光加工装置投入工业应用。25、45kW 级的大功率 CO_2 激光器和 2、4kW 级的 YAG 激光器获得开发并投放市场。千瓦级的 CO_2 激光加工机械手、激光车床和使用光导纤维的 YAG 激光加工机械手装置相继问世，并进入工业应用领域。中国从 70 年代开始应用激光加热，1991 年研制成功万瓦级 CO_2 气体激光器。

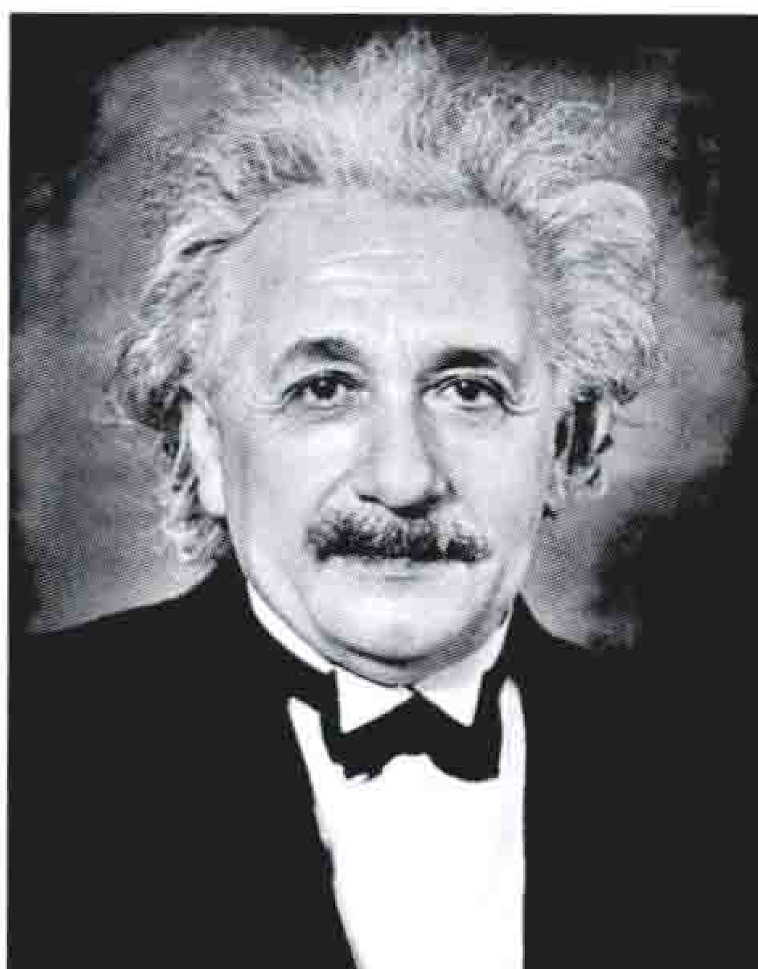


图 2　A. 爱因斯坦

参考书目

阎吉祥．激光原理技术及应用．北京：北京理工大学出版社，2006.

jiliangdian

计量点 (measurement point) 电力系统中应计量电能并安装电能计量装置的位置。在计量点计量的电能是合同双方进行贸易结算或发电企业、电网经营企业、供电企业内部进行管理考核的依据。因此，合理设置计量点是保证电能计量公平、公正、准确、可靠的基础。计量点有贸易结算计量点和考核计量点两大类。

贸易结算计量点 又称计费计量点。此类计量点的电能计量装置原则上应安装在购售电设施的产权分界处。按结算对象不同贸易结算计量点又分为用户计费计量点和关口计费计量点。用户计费计量点计量供电企业与电力用户之间的电能交换量并据此进行电费结算。关口计费计量点计量发电企业与电网经营企业之间、不同区域电网经营企业之间的电能交换量并据此进行电费结算。关口计费计量点一般有发电上网关口、跨国输电关口、跨区输电关口、跨省输电关口等。

考核计量点 用于发电企业、电网经营企业或供电企业内部进行经济技术指标分析和考核的电能计量点，分析和考核的主要内容是线路损耗、变压器损耗、母线平衡电量、台区损耗等。按考核对象可分为关口考核计量点和企业内部考核计量点。此类电能计量装置一般设置在应进行电能计量及技术指标考核的各电压等级变压器侧、输电和配电线路端以及无功补偿设备处。

jiare yuanjian

加热元件 (heating element) 与电源连接能够将电能转变成热能的元件。它由发热体及附件组成，用于间接电阻炉加热。加热元件是电阻炉的关键部件，正确地选用加热元件材料，关乎电阻炉的使用性能和寿命。

加热元件应具备的技术性能：①良好的高温力学性能和化学稳定性；②具有较大的电阻率；③具有较小的电阻温度系数；④低的热膨胀系数；⑤良好的机械加工性能。

加热元件按其所用材料和结构的不同，分为金属加热元件、非金属加热元件和组合型加热元件。

金属加热元件 用电热合金或纯金属线材、带材绕制而成，通常根据各种电阻炉的技术要求设计制造。

电热合金加热元件 用铁铬铝或镍铬合金制成，一般用电阻丝绕制成螺旋形，或用电阻带和电阻丝弯制成波形带和波形线等，见表。元件两端焊有截面积较大的引出棒，截面积应当等于或大于加热元件截面积的3倍，用来连接电源。这类加热元件在氧化性气氛中最高使用温度，视电热合金材质而定，最高可达1400℃。在其他气氛中使用时，其元件最高使用温度随气氛的不同相应地有所降低。这类加热元件通常可直接接在低压配电网上，而不需要调压装置，是间接电阻炉中用得最多的加热元件。

纯金属加热元件 电阻发热体部分由钨、钼、钽、铂等高熔点金属制成，有线材波形、薄壁管形、细丝编织网等形状，如图1所示。最高工作温度：钨为2400℃，钼为1800℃，钽为2200℃，铂为1600℃。钨、钼、钽在高温氧化性气氛中易氧化，故必须在真空、氢气等还原性气氛、惰性气体等中性气氛下使用（钽不能在氢气及氮气中使用）。铂可以在氧化气氛中使用，但不能在氢气中使用。这种加热元件的电阻率较小，而电阻温度系数较大，在升温过程中电阻值变化大，使用时必须配备调压装置，使其功率保持在允许的范围内。铂材料由于价值昂贵，一般很少使用，钨、钽材料多用于实验室电阻炉或某些特殊要求的场合。几种高温纯金属加热元件只有钼的用途最广，多用于各种真空炉、氢气保护连续烧结炉等。

电热合金加热元件的结构形式

类别	结构形式	尺寸关系	
		铁铬铝合金	镍铬合金
线材螺旋形	[图：h, D, d]	$h=(2\sim4)d$ 元件温度<1000℃：$D=(6\sim8)d$ 元件温度>1000℃：$D=(5\sim6)d$	$h=(2\sim4)d$ 元件温度<1000℃： $D=(6\sim9)d$ 元件温度>1000℃： $D=(5\sim8)d$
带材波形	[图：r, H, h, b, a]	$a\geqslant1.5$mm $b=(8\sim12)a$ $r=(4\sim8)a$ $h\geqslant(4\sim6)r+2a$ $H<100a$	$a\geqslant1.5$mm $b=(8\sim12)a$ $r=(4\sim5)a$ $h\geqslant(4\sim6)r+2a$ $H<80a$
线材波形	[图：r, d, h, t, H, θ]	$t=\left(\frac{1}{4}\sim\frac{1}{6}\right)H$ $r=(2\sim4)d$ $\theta=10°\sim20°$ $h\geqslant(4\sim6)r+2d$ $H=150\sim250$mm	$t=\left(\frac{1}{4}\sim\frac{1}{6}\right)H$ $r=(2\sim4)d$ $\theta=10°\sim20°$ $h\geqslant(4\sim6)r+2d$ $H=200\sim300$mm

非金属加热元件 主要有碳化硅加热元件、二硅化钼加热元件、石墨加热元件以及铬酸镧加热元件。这类加热元件电阻值一般较低，电阻温度系数大，长期使用后有些元件电阻值因老化而增大，因此在使用时必须配备调压装置。

碳化硅加热元件 以焦炭和石英砂作原料，经焙烧后得碳化硅生料，再加沥青、焦油等黏结剂，经过挤压加工成型后在高温



图1 纯金属加热元件
（胡叔良 提供）

下烧结而成。碳化硅含量可达98%左右。元件分发热和引出段两部分，发热段电阻大，电阻热主要在这部分产生。引出段供穿过炉墙并与电源连接用，此部分有的加粗，有的不加粗但要浸铝，以便减少该部分的电阻。发热部分直径在6～40mm范围内，长度在100～2600mm范围内。元件制成多种规格供用户选用，其中应用最多的是硅碳棒，它可以制作成直棒形、U形和W形，端头分为等直径形和加粗形。其次是螺旋管形（也有直通管形），见图2。元件的最低使用温度为850℃，最高不应超过1600℃，主要用于炉温在1300℃以上的间接电阻炉中。

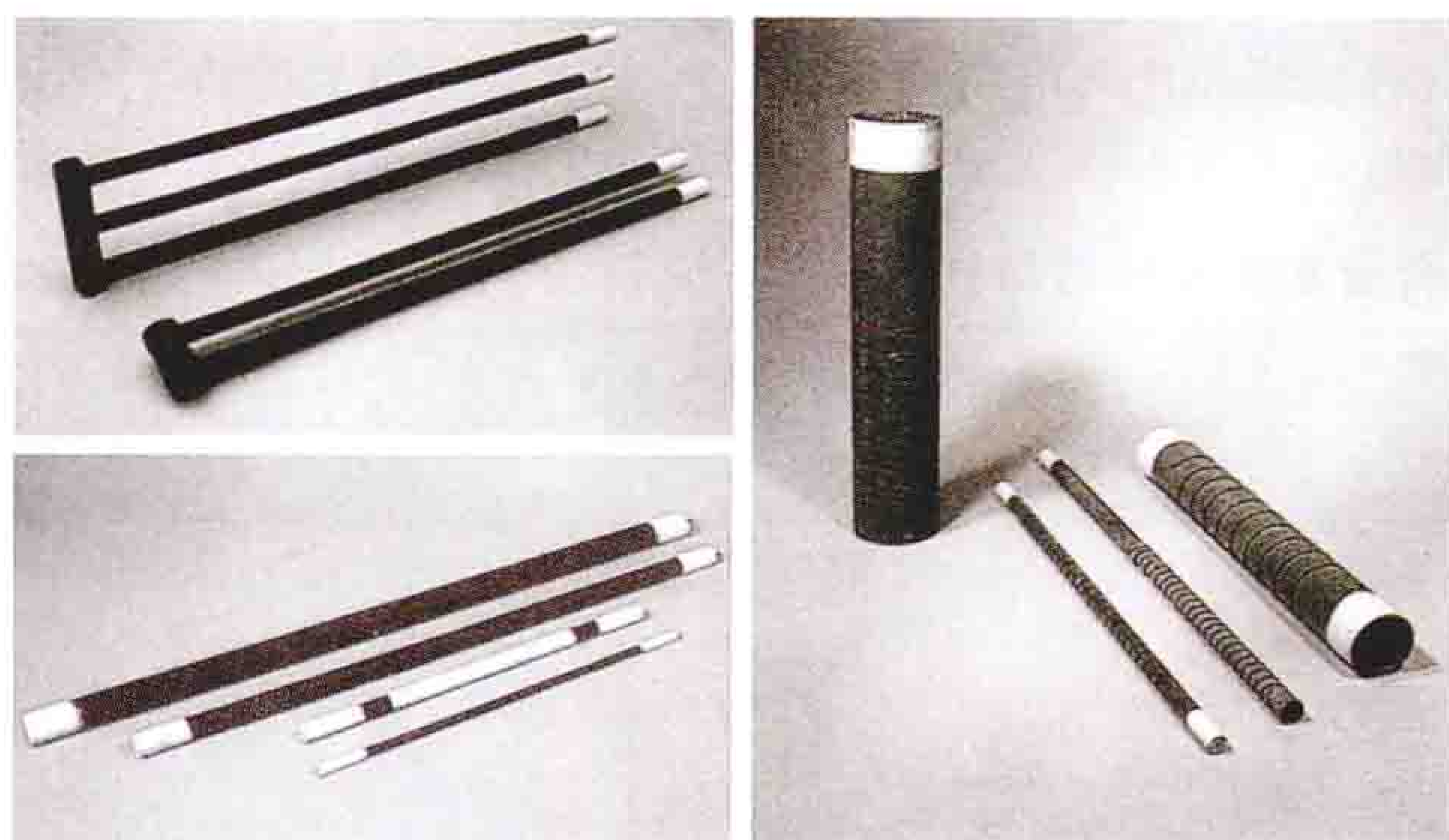


图2　碳化硅加热元件

二硅化钼加热元件　以二硅化钼为原料，添加黏结剂，用粉末冶金法压制烧结而成。元件的形状多呈U形和W形，见图3，室温时硬而脆，高于1350℃时变软并具有延伸性。与碳化硅棒相比，二硅化钼的使用温度更高。其发热部分直径有6mm与9mm两种，引出端直径为12mm和18mm，U形元件的发热部分长度在300～2100mm范围内。元件的最高使用温度可达1800℃，适用于炉温在1200～1650℃的高温电阻炉。

石墨加热元件　用高纯优质石墨加工而成，其特点是易于加工，价格较钨、钼、钽便宜，且有较高的电阻率，电阻随温度变化不大。可以制成棒、管、板、筒等形状，也可以制成U形、W形和螺旋形。此外，高纯石墨还可以织成带、布和绳。在保护气氛中，石墨加热元件最高使用温度可达2500℃，常用温度范围在1300～2200℃。石墨在500℃以上会剧烈氧化，因此须在真空或保护气氛中使用。

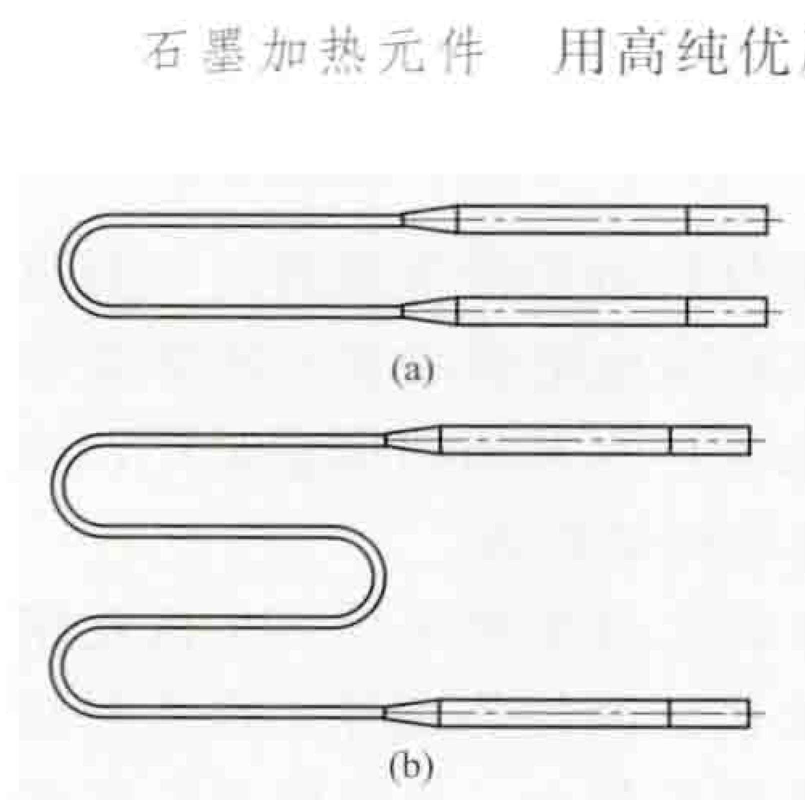


图3　二硅化钼加热元件
(a) U形；(b) W形

铬酸镧（$LaCrO_3$）加热元件　在氧化气氛中可用于工作温度达1800℃的唯一加热元件，使用寿命可达3000h以上。但由于此种材料成品种类少，升温速度限制在200℃/h以下，大多用在实验室炉中。

组合型加热元件　由发热导体与绝缘材料及其他保护材料组成的加热部件，是一种独立完整的加热元件。其结构形式很多，主要有管状加热元件、电热辐射管、柔性加热元件、镶嵌式加热元件、红外加热元件等。

管状加热元件　通常是在金属管内装入螺旋状电热合金丝，管内空隙填以导热性和绝缘性良好的结晶氧化镁细粉，再在端部加上与外管绝缘的接头，经缩管机弯制而成。金属管根据使用要求可用普通钢管、不锈钢管等，成型后管径一般不超过20mm。可用来加热空气、油、水、硝盐、碱、低熔点合金等。管状加热元件具有热效率高、寿命长、安装方便、使用安全等优点。根据需要这种元件可制成多种形状，如棒形、U形、W形、螺旋形等。在低温电阻炉和家用电器中得到广泛应用。管状加热元件端部结构如图4所示，其最高使用温度视使用场所不同而异，一般不超过550℃。为了增加表面散热面积，可在元件表面焊接上截面为各种形状的散热片，以强化散热效果，提高热效率。

图4　管状加热元件端部结构

电热辐射管　由电热合金丝或带绕制在组合瓷件上并成为一体（称为管芯），外部套同心薄壁型耐热钢管（管径一般大于80mm，长度不超过1500mm）组成，瓷件不但固定加热元件且与外管绝缘，见图5。耐热钢管的作用是防止渗碳气体对加热元件的腐蚀，延长其使用寿命。此种元件的最高使用温度一般不超过950℃，一般用在各种气体渗碳炉中（见控制气氛电阻炉）。为了方便地装卸加热元件，还有不用耐热钢管的电热辐射管，实际上就是直接使用管芯，主要用在氧化或中性气氛炉中。

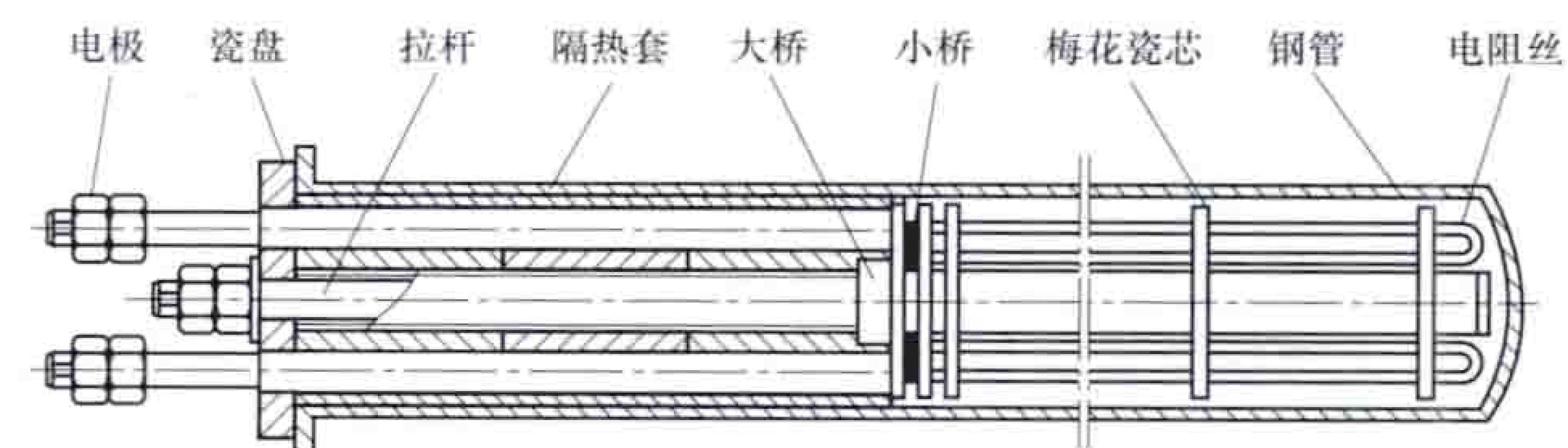


图5　电热辐射管结构

柔性加热元件　由电热合金丝与绝缘材料编织而成，外加引出线，必要的绝缘和保护用护套。绝缘材料按柔性加热元件工作条件可分别采用塑料、棉纱、玻璃纤维、石英纤维以及小直径短瓷管等，也有用碳粒和合金、树脂等制成带状或平板状的柔性加热元件。柔性加热元件可制成多种形式，有电热电缆（或绳）、电热带、电热毯、电热套、电热罩等。柔性加热元件可以包裹在管道、化工容器等外壁上供焊前预热及焊后消除应力退火，也可以用于化工厂管道、阀门、反应罐等的加热保温，自来水管道、阀门等的防冻，室内地板的加热等。柔性加热元件的最高使用温度，用塑料或棉纱绝缘的不超过60℃，用玻璃纤维绝缘的不超过350℃，用石英纤维丝包裹的可达到800℃。

镶嵌式加热元件　利用真空成型工艺将电热合金丝固定在耐火材料模块中的一种复合型加热元件。根据真空成型模块形状的不同，有圆筒形、半圆筒形、平板形、箱体形等。

加热元件的镶嵌方式有微露形、嵌入形、沟槽形等。其主要特点：①电阻发热元件与绝热材料构成一体，筑炉方便，易维修；②热容量小，升、降温快，省时；③质量轻、绝热好、节能。

红外加热元件　通电后能产生红外线辐射来加热工件的加热元件，常用的红外加热元件有管式、板式、带状和灯式等类型。按基体材质结构可分为金属管、陶瓷管、SH系列乳白石英管、陶瓷板、碳化硅板以及带红外涂料的电阻棒、带等。其中以600℃以下应用的SH系列乳白石英管和碳化硅板式红外加热元件使用最为广泛。（见红外加热）

jiadian jueyuan jiegou

家电绝缘结构

（insulation structure of household appliances）　家用电器中用以阻隔人体接触带电部件或隔离不同电位的导电性部件的保护结构。其构成了产品功能性结构的全部或一部分，分为基本绝缘、附加绝缘、双重绝缘和加强绝缘。

基本绝缘　施加于带电部件上提供防触电的基本保护的绝缘。

附加绝缘　在基本绝缘之外附加的一层独立绝缘，从而构成同时存在的两层绝缘，附加绝缘可在基本绝缘失效情况下，继续提供绝缘保护。如常见的带护套的电源线、紧邻金属导线的塑料层就是基本绝缘，外层的塑料层就是附加绝缘。

双重绝缘　由基本绝缘和附加绝缘构成的绝缘系统。上述电源线的绝缘结构就属于双重绝缘。

加强绝缘　等效于双重绝缘的单一绝缘结构。它提供的防触电保护程度相当于双重绝缘，但却是一种单独的绝缘结构。家用电器中常见的插头，就是采用加强绝缘结构的典型例子。

jiayong diandong fengrenji

家用电动缝纫机

（household electric sewing machine）　一种以电为动力的用于缝制作业的家用电器。家用电动缝纫机（见图）按功能可分为普通（直线）机、多能机（含半多能、全多能、半自动多能、全自动多能机）。普通缝纫机走直线线迹，用途单一，价格便宜；多功能缝纫机可走曲线线迹和花迹，价格较贵。按机架结构形式可分为手提式和框架式。家用电动缝纫机一般为手提式，机头安装在台板上，台板有板式和悬臂式两种，悬臂式更适于缝制袖管、裤管等。使用电动缝纫机时，只要打开机箱，把缝纫机放在桌上，脚踏开关放在地上即可。它省去了笨重占地的铸铁机架，可做得非常轻巧，有的只有几千克重。



家用电动缝纫机

电动缝纫机机壳内有一台微型电动机，接通电源，踩动脚踏开关，即可控制缝纫机的工作。它起动快，缝速高，缝纫效率高。这种缝纫机的机头部分具有制布、送布、勾线和挑线功能。机针除可垂直上、下运动外（缝出的线迹是直线排列的），还可左右横向摆动（缝出的线迹成为锯齿状），如改变针杆的左右摆动量和送布牙的前后送进量，就会产生不同的锯齿形状，利用锯齿线迹可缝出规则、美观、不同风格的花纹图案。

电动多功能缝纫机的机腔内部有成套的花模凸轮。利用它们可以控制机针的横向侧摆量和送布牙的纵向进给量，几个花模凸轮的不同组合方式，可得到不同的缝纫花纹。花纹的改变十分方便，操作者只要按压缝纫机正面饰框中的适当按钮（或旋动花纹变换旋钮，或推动花纹变换推杆），便可立即变换花纹。

为了扩大功能，缝纫机还可同时用两根针缝纫，两针上穿有不同颜色的面线，使图案色彩更加绚丽。此外，还可在电动基础上加自动控制装置，如定位停针装置、点缝装置、电源变化及自动适应装置、自锁装置等。

缝纫机经过一段时间使用后应进行保养，主要措施有：①调节传动带张紧力。使用一段时间后发现转速变慢，应检查传动带的松紧。检查时在带中部用手指轻按，受力点下垂5mm为松紧合适。用两根传动带时，转速快的一根带子安装可适当松些。②电动机轴承处定期加油。经常使用的机器每季度在电动机端盖上小油孔内加缝纫机油1～2滴。③传动带的更换。三角带靠两侧面摩擦传递功率，使用久后因带侧磨损，造成打滑，应换新带。④电刷的更换。电刷是易损件，使用时忌油，在使用一定时间后应检查其磨损情况，当电刷长度磨去2/3后（约剩5mm）就不宜使用，应及时更换。⑤保持清洁。电动机及调速器应保持清洁，缝纫时出现的绒丝等可能侵入电器，影响正常使用，应定期清除堆积的尘埃，窗孔内的尘埃用软刷刷除。不用时应将箱盖关上，并存放在干燥、无化学腐蚀的环境中。

jiayong diandong gongju

家用电动工具

（household electric drive tool）　可供家庭条件下使用的，以电动机或电磁铁为动力，通过传动机构驱动工作头的机械化工具。电动工具结构轻巧、效率高、携带使用方便，已被广泛应用于各个领域。家用电动工具主要用于房屋修缮，室内装修，设备、汽车的修理，家具制作和修理，以及园艺整修等。

分类　家用电动工具按用途分为钻孔类工具、锯割类工具、砂磨类工具、园艺类工具及其他类工具等。如电钻、冲击电钻、电锤、电动角向磨光机、电动平板摆动式砂光机、电圆锯、电刨、电喷枪、电动修枝机等。

为了保证家用电动工具安全使用，根据不同的使用要求，对于不同的家用电动工具分别采取不同的防触电保护方式，据此将家用电动工具分为Ⅰ类工具、Ⅱ类工具、Ⅲ类工具。

（1）Ⅰ类工具。额定电压超过50V，绝缘结构中多数部位只有基本绝缘，一旦绝缘损坏，操作者即有触电危险。这类工具对于操作时人手可触及的金属零部件必须可靠地进行保护接地。

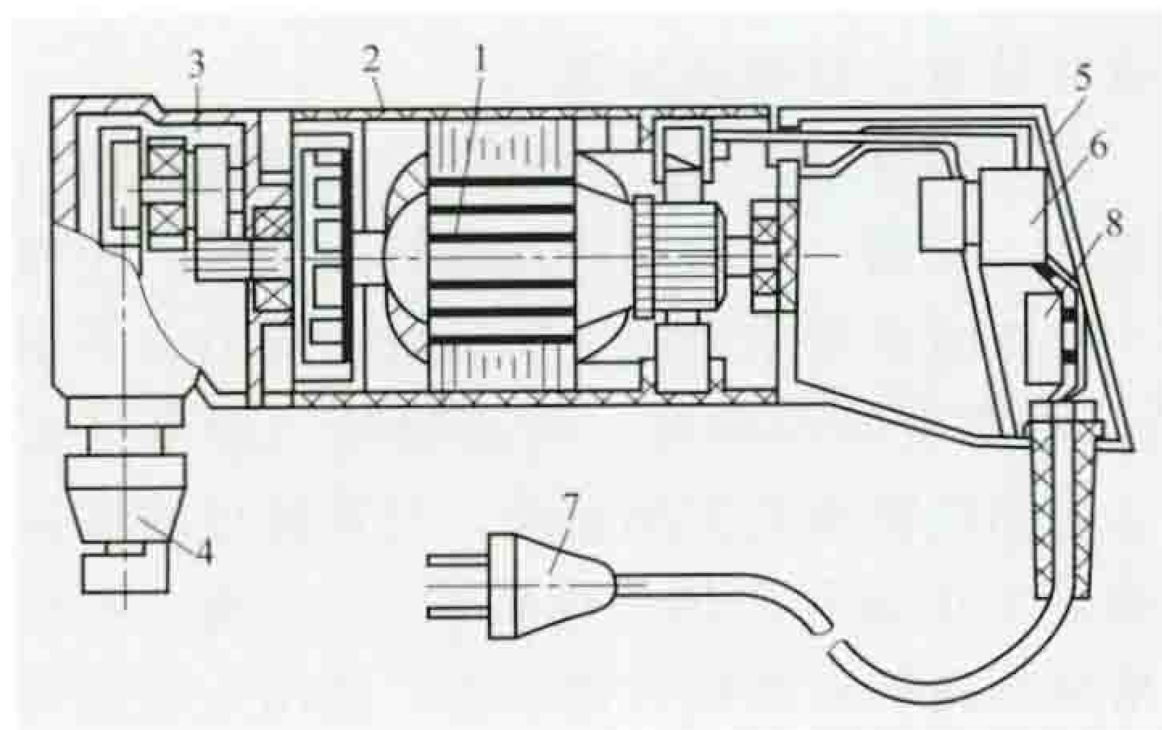
（2）Ⅱ类工具。即双重绝缘工具。额定电压超过50V，绝缘结构采用双重绝缘或加强绝缘，或两者综合的绝缘形式。双重绝缘指除基本绝缘外还有一层独立的附加绝缘，即

使基本绝缘损坏仍可保证操作者与带电体隔离，不致触电。而加强绝缘则是对基本绝缘性能进行加强和改善，使其具有与双重绝缘相当的介质强度和机械强度，从而有同等的安全保护效能。

(3) Ⅲ类工具。特低安全电压工具。额定电压不超过50V。其触电保护依靠安全特低电压供电，在工具内不会产生比特低电压高的电压。特低安全电压通过安全隔离变压器与供电电网相隔开或由电池组来取得。

由于Ⅱ类、Ⅲ类工具都能可靠地保证使用时的电气安全，所以规定不必要再采用保护接地。

组成 家用电动工具主要由电动机、外壳和手柄、传动机构、开关、干扰抑制器或元件及电源连接装置件等组成，见图。



家用电动工具的基本结构
1—电动机；2—外壳；3—传动机构；4—工作头；5—手柄；6—电源开关；7—电源线与插头；8—干扰抑制器

(1) 电动机。主要选用单相串励式、单相异步电容式电动机和永磁直流电动机。单相串励电动机转轴上如果设有绝缘层，则称为转轴绝缘，用作转子铁芯附加绝缘，以使转子铁芯与转轴等外露金属零件在电气上隔开。转轴上装有冷却风扇，风扇大多采用离心式，进风口和出风口置于外壳上。

(2) 外壳和手柄。一般用增强尼龙、聚碳酸酯等性能优良的工程塑料制成。外壳具有支承和保护内部结构的作用，又是电动机定子铁芯的附加绝缘。手柄形式有手枪式和托柄式两种，但也有的无专设手柄，直接握持外壳操作，有的工具除有一般手柄外，在前端还设置辅助手柄。

(3) 传动机构。用来传递能量、变速和改变运动方式。为适应不同的作业加工，运动方式有旋转、往复、冲击和冲击与旋转兼有的复合运动。传动齿轮采用0.6～0.8mm的小模数高度或角度修正的斜齿圆柱齿轮、螺旋锥齿轮等。

(4) 开关。有电源开关和控制开关，一般均装置在手柄上。电源开关的结构大多采用两极桥式双断触头，由瞬时动作机构使触头快速通断，而与使用者推动揿手的速度无关。手揿式开关能自动复位和切断电源，有的还带自锁机构。控制开关主要是无级调速开关。

(5) 干扰抑制器。用于抑制对无线电和电视干扰的组件或元件，置于手柄内，有基本抑制器和附加抑制器两种。

(6) 电源连接装置件。包括电源插头、软电缆或软线及电缆护袋。Ⅱ类工具采用电源插头与软电缆或软线压制成一体的不可拆卸电源插头；Ⅰ类工具采用三芯软电缆或软线，其中一芯绿质双色线为接地线，与三极电源插头接地极连接；Ⅱ类、Ⅲ类工具采用二芯软电缆或软线，无接地线。软电缆或软线引入工具的入口处，有夹紧措施，并设置柔性护袋，以保护电缆和软线不被拉脱和受折。

jiayong dianqi

家用电器 (household electrical appliances) 在家庭及类似场所使用的各种用电器具，常简称为家电。家用电器是现代科学技术发展的产物，它使人们从繁重的家务劳动中解放出来，为人们创造了方便、舒适的生活和工作环境，在饮食、烹饪、衣着、美容、卫生、保健、文化、娱乐等方面，深刻地改变了人们的生活面貌，已成为现代家庭生活所必需的设备。

简史 家用电器起源于美国。1879年美国人T.A.爱迪生(Thomas Alva Edison，1847—1931)发明了白炽灯，开创了人类电气照明的时代。进入20世纪以后，电熨斗在美国首先投入市场，受到广泛的欢迎。1907年，具有现代产品雏形的吸尘器问世。1910年，电动洗衣机和压缩式电冰箱相继问世。1914年电灶出现。1919年，超外差收音机问世。同年，第一个定时播发语言和音乐的无线电广播电台在英国建成。1923～1924年，美国人V.K.兹沃雷金(Vladimin Kosma Zworykin，1889—1982)相继发明了摄像管和显像管；1931年，他组装成世界上第一个全电子电视系统。第二次世界大战后，电视广播便在各国逐渐普及。1930年出现了空气调节器。1939年，全自动洗衣机研制成功。1947年，美国人P.L.斯潘塞(P.L.Spencer)获得了第一个微波炉专利。50年代随着电子工业的发展，彩色电视机开始进入家庭。70年代微型计算机迅速发展，80年代以个人计算机为中心的家庭自动化系统出现，90年代模糊控制技术的应用、网络技术逐渐普及，加速了家用电器向自动化和智能化方向发展，一批高技术家用电器相继出现，信息家用电器崭露头角。

中国在1949年以前基本没有形成家用电器工业，仅有少数修造厂从事修理、装配业务。中国第一家家用电器制造厂，也是中国第一家电风扇生产厂——上海华生电器制造厂创建于1916年，20年代初开始生产电风扇，但产量很少。1956年天津医疗器械厂试制出第一台封闭式压缩机电冰箱。1958年开始黑白电视广播。1960～1965年，上海相继试制出第一台吸尘器、涡卷式双桶洗衣机和窗式空调器。70年代初开始彩色电视广播。80年代，中国家用电器工业得到很大发展，基本形成工业体系。90年代以后，中国逐步成为世界家用电器生产大国。

基本要求 对家用电器的基本要求主要有安全性、实用性、可靠性，并强调环境保护。

(1) 安全性。应在保证产品质量的前提下，使产品达到安全可靠的要求，主要涉及触电、烫伤、火灾、机械伤害、毒性等。国际电工委员会(IEC)制定了一系列家用电器的安全标准，中国家用电器的安全标准采用与IEC对应标准相同的标准化体系和技术内容(等同采用)。

(2) 实用性。要求结构合理、操作方便，使用者不需具备专门技术就能正确使用。家用电器的设计应与家庭或类似环境相协调。

(3) 可靠性。可靠性是反映家用电器质量的持续性的重要指标，在产品的寿命期间，其安全性和功能都要与设计目标相吻合。

(4) 环境保护。降低能耗，提高效率，减少噪声等有害因素，涉及家用电器的设计、生产、运输、销售及使用等

环节。

分类　家用电器涉及的产品范围和分类方法，在各个时期和各个国家都不尽相同，没有统一标准。美国把家用电器分为大件器具、小件器具、空气调节器具、家用电子器具等。日本把家用电器分为家用电气器具和家用电子器具。

中国是按照技术原理和标准化体系进行划分的。按技术原理可分为电热器具、电动器具、电子（音视频）器具等。按标准化体系可分为制冷器具、清洁器具、厨房器具、通风器具、取暖器具、美容美发器具、熨烫器具、保健器具、音视频器具、娱乐器具及其他器具。

（1）电热器具。利用加热元件将电能转换为热能的用电器具，包括电饭锅、微波炉、电热毯、电热水器等。

（2）电动器具。利用电动机或电磁铁将电能转换为机械能的用电器具，包括洗衣机、电风扇、吸尘器、电冰箱、空调器、电动剃须刀等。

（3）电子（音视频）器具。利用电子技术获得声像效果的用电器具，包括电视机、收音机、录像机、摄像机、个人电脑、电子游戏机、视盘机和家庭影院等。

（4）制冷器具。用于调节或改变局部空间或介质温度的器具，包括电冰箱、冷冻箱、冷饮机、制冰机、冰淇淋机、房间空气调节器等。

（5）清洁器具。用于清洁衣物或室内环境的器具。包括洗衣机、干衣机、真空吸尘器、洗碗机、地板打蜡机、擦窗机等。

（6）厨房器具。在厨房或类似场所使用的、用于食物加工、烹饪或为食品加工、烹饪服务的器具。包括电饭锅、电炒锅、电水壶、电烤箱、电磁灶、微波炉、吸油烟机、食品加工机、蔬菜混合机等。

（7）通风器具。用于局部空间空气交换或空气搅动的器具。包括台扇、落地扇、顶扇、吊扇、转页式风扇、回转扇、换气扇等。

（8）取暖器具。用于提升局部空间或介质温度的器具。包括电热毯、电暖器等。

（9）美容美发器具。用于人们修饰容貌的器具。包括电吹风、卷发器、电热梳、电推剪、电动剃须刀、超声波洗面器等。

（10）熨烫器具。用于平整或定型衣物面料的器具。包括电熨斗、熨平机、衣物定形机等。

（11）保健器具。用于个人护理或身体保健的器具。包括电动按摩器、电动按摩椅、电子血压计和电子体温计等。

（12）娱乐器具。供娱乐功能的器具，如电动麻将机等。

（13）其他器具。不宜划归为上述类别的器具，如电动缝纫机等。

家用电器按照防触电保护结构类型分为0类、0Ⅰ类、Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类。①0类器具。依靠基本绝缘防止静电危险，不设接地保护的器具。这类器具只要求带电部分与外壳隔离，没有接地要求，主要用于人们接触不到的地方。②0Ⅰ类器具。整体具有基本绝缘并带有一个接地端子的器具，其电源软线不带接地导线，插头也无接地插脚。③Ⅰ类器具。具有基本绝缘且带有一个附加安全防护措施的器具。将易触及的导电部件连接到设施固定布线中的接地保护导体上，万一基本绝缘失效，易触及的导电部件也不会带电。④Ⅱ类器具。不仅依靠基本绝缘，而且提供双重绝缘或加强绝缘等附加安全防护措施的器具。该类器具没有保护接地或依赖安装条件的措施。⑤Ⅲ类器具。依靠安全特低电压的电源来提供对电击的防护，且其产生的电压不高于安全特低电压的器具。（见家电绝缘结构）

图1～图8为各种典型家用电器外形图。



图1　电冰箱（家用电冰箱有单门、两门和三门之分，容量通常在20～500L）



图2　隔水炖盅



图3　电饭煲



图4　电烤箱



图5　离子梳（内置负离子发生器，可有效防止静电）



图6　手持多功能蒸汽清洁机



图7　气电磁集成灶（融合燃气、电磁两种加热方式）



图8　直饮机（内置滤芯将自来水中的杂质过滤掉并输出质量达标的饮用水）

展望　家用电器产品的发展趋势主要体现在智能化及智能家居、网络化及网络家电、节能环保等方面。

（1）智能化及智能家居。“智能家电”就是具备灵敏的感知能力、正确的思维（包括学习）能力、准确的判断能力、有效的执行能力并将这些能力部分或全部加以综合利用的家电产品，通过硬件形式或软件形式或软硬件结合的形式实现。

智能家居就是以住宅为平台，集合了能满足人们家居生活各方面需求的一系列智能家电或其他产品的居住系统，涉及安防、休息、餐饮、娱乐、通信、健康、卫生、洗浴、垃圾处理等诸多方面的智能化功能。智能家居结构示意如图9所示。

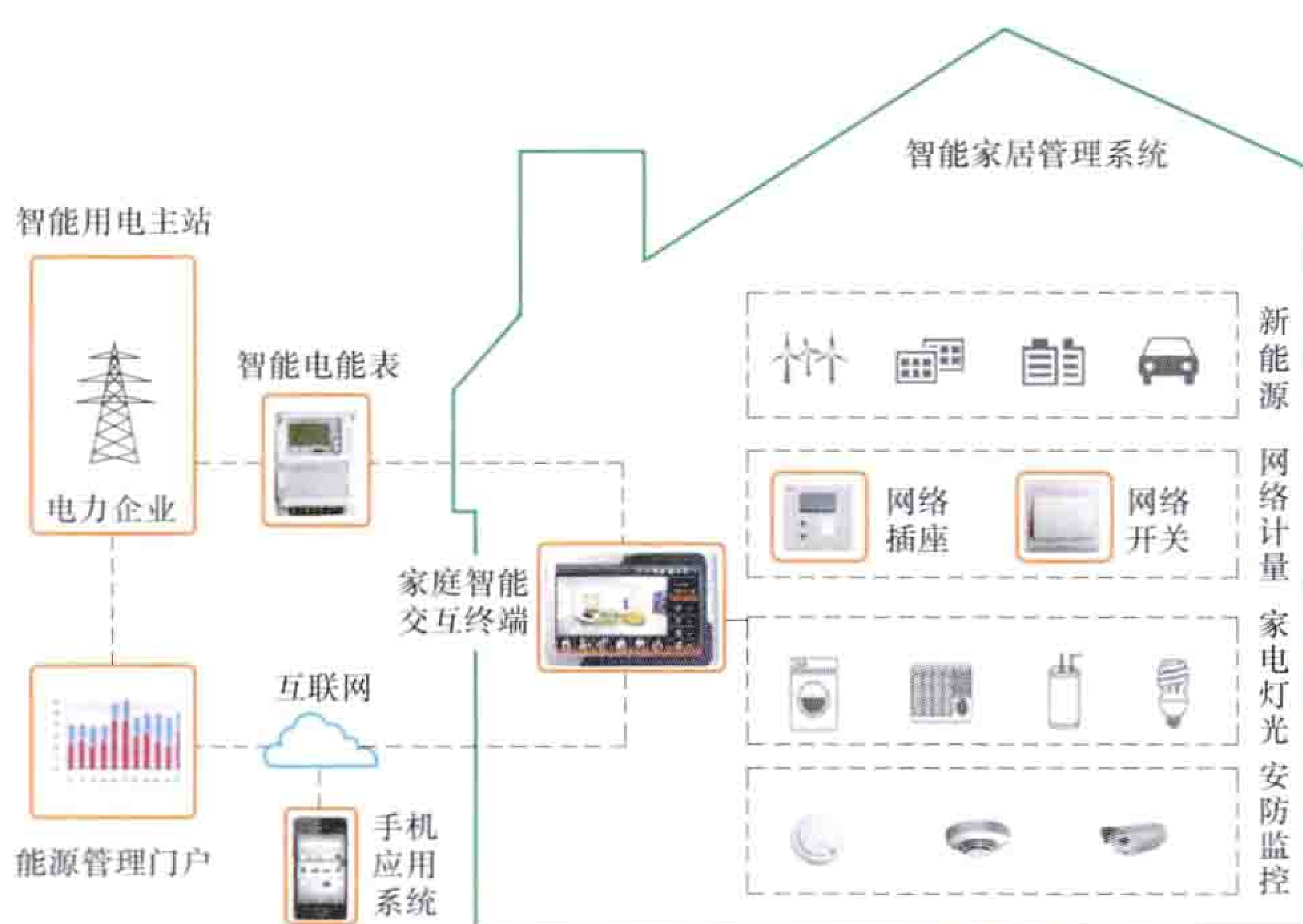


图9　智能家居结构示意图

（2）网络化及网络家电。将互联网技术、物联网技术等应用到家用电器中，实现远程控制、远程服务、互联互动并对家用电器的智能化提供网络支持。

（3）节能环保。氯氟烃类制冷剂的替代、重金属等有害物质的限量、清洁生产的推广、废旧家电的回收利用、不可再生资源的节约、电磁干扰的控制、节水节电的强制管理等，构成了家用电器节能环保的目标体系。

jiayong dianqi biaozhun tixi

家用电器标准体系　（standard system of household appliances）　由家用电器行业的各类标准组成的一个有机系统。家用电器标准体系于20世纪70年代末至80年代初逐渐形成，已经形成结构合理、层级清晰、功能健全的标准体系。

家用电器标准体系的建立可以以系列安全标准的建立为主要标志，而系列安全标准则是依据国际电工委员会（IEC）的标准而建立的，并与其保持着技术水平的一致和更新时间的基本一致。

中国家用电器标准体系　由安全标准、产品性能及测试方法标准、零部件标准、服务和维修标准、资源与环境保护标准五大系列组成。

安全标准　由电器安全标准、安全使用年限标准、电磁兼容标准3个子系列构成。

电器安全标准涉及家用电器安全性能的技术要求和评价方法，主要涉及因使用家用电器而可能引发的人身安全、财产安全和环境安全等，是家用电器设计、生产和质量评价的基本依据，通常以强制性国家标准的形式发布实施。

安全使用年限标准涉及家用电器安全使用寿命的技术要求、评价方法，是以家用电器安全标准为基础，综合考虑其使用环境、生产过程和使用特点等对相应安全标准的一个必要补充。

电磁兼容标准对家电产品电磁骚扰发射和抗扰度做出限定和要求，其中关于电磁兼容要求的标准为强制性标准，关于电磁兼容测试方法的标准为推荐性标准。系列标准对有关电磁兼容的术语和定义、不同环境下抗扰度试验的要求与方法等做出了详细的规定。

产品性能及测试方法标准　由产品综合性能标准、产品性能测试方法标准、产品能效标准、产品噪声标准、产品可靠性标准、产品抗菌除菌净化标准、产品包装标准7个子系列构成。

产品综合性能标准一般以一种或一类产品的名称作为标准的名称。标准对此类产品的分类、型号命名、使用性能、机械性能、电气性能、试验方法、检验规则、标志、包装、储存和运输做出相应的规定。产品综合性能标准为推荐性标准，对产品综合性能进行制约和规范。

产品性能测试方法标准对某一种或某一类产品的主要性能规定统一的测试方法，但并不对产品的性能优劣提出具体要求，是推荐性标准。

产品能效标准规定了家电产品耗电量限定值、能源效率等级的要求，是强制性标准。

产品噪声标准主要包括噪声限值和噪声测试方法两项内容。家用电器工作时噪声的大小是衡量其性能的重要指标之一，同时，降低噪声也是环境保护的要求。产品噪声标准既有推荐性的也有强制性的。

产品可靠性标准用来衡量、评价家用电器品质，是对电器安全标准系列的一个支撑，其意义在于保证家用电器可靠性满足消费者预期要求。产品可靠性标准全部为推荐性标准。

产品抗菌除菌净化标准属于家用电器的功能性扩展标准领域，针对家用电器的抗菌、除菌、净化功能规定相应的技术要求和试验方法，以规范制造厂商的行为和保护消费者的合法权益。产品抗菌除菌净化标准为强制性标准。

产品包装标准对产品包装的基本要求、产品包装防护性能的类型与要求、包装箱技术要求、试验方法、箱面标志及产品随带文件、检验规则等做出规定。在此通则基础上，还会建立不同产品的包装特殊（要求）标准。产品包装标准属于推荐性标准。

零部件标准　由专用零部件标准和通用零部件标准两个子系列构成。

专用零部件标准涉及制冷器具零部件（如电冰箱、空调用制冷压缩机、温控器、蒸发器、冷凝器等）、取暖器具零部件、清洁及熨烫器具零部件、厨房器具零部件等主要零部件材料标准。专用零部件标准为推荐性标准。

通用零部件标准针对与家用电器密切相关的，如自动控制器、电动机、变压器、耦合器、小型熔断器、热电偶、低压电涌保护器、连接件、插头、插座、器具开关、电容器和电阻器等通用零部件建立的标准。

服务和维修标准　为保证家用电器产品的安全性及正常工作和使用，规范产品的售后服务而制定的标准，包括针对房间空气调节器、电热水器等需要售后安装的产品建立的安

装标准，用于规范商家售后服务行为的售后服务标准等。

资源与环境保护标准　为适应社会可持续发展和环境保护要求而制定的标准。该系列标准也是应对发达国家技术性贸易措施的主要方法。

国际家用电器标准体系　国际上，家用电器领域主要有两大标准体系，即以欧洲为主的 IEC 标准体系和以美国 UL 标准为主的北美标准体系。两个标准体系在家用电器的安全理念、测试方法等方面存在一些差异。中国是 IEC 标准体系成员国，在制修订国家标准中，条件适合时，均与 IEC 标准建立了某种程度的关联关系。

jiakong peidian xianlu

架空配电线路

(overhead distribution line)　将导线用绝缘子和金具等架设在杆塔上，使导线与地面和建筑物保持一定距离而构成的配电设施。通常中压架空配电线路的电压等级为 1～20kV，1kV 以下的称低压架空配电线路。与电缆线路相比，架空配电线路（见图）具有造价低、维护方便等优点，但由于架空线路占用通道大、单位通道输送功率较小、裸露带电部分多、故障率较高，因此，较适用于通道条件较好、中低负荷密度、供电可靠性要求不是很高的配电区域。



架空配电线路（徐斌　摄）

类型　按使用杆塔形式可以分为钢筋混凝土电杆线路、铁塔线路、钢管杆线路、木杆线路和混合式杆塔线路；按导线类型可以分为裸导线架空线路和绝缘导线架空线路；按照杆塔上的线路回路数可以分为单回路线路、双回路线路和多回路线路。

基本构造　架空配电线路由导线、绝缘子、杆塔、杆塔基础、拉线、横担、金具和接地装置等主要部件构成，除线路本体外，还包括在其上架设安装的配电设备，主要有柱上变压器、柱上开关、隔离开关、跌落式熔断器、无功补偿装置等。

导线　作用是传输电能，要求导线具有低电阻率、较高机械强度和抗腐蚀性能。导线分为裸导线和绝缘导线，绝缘导线又可分为单芯绝缘导线和集束绝缘导线。常用的裸导线为铝绞线、铝合金绞线或钢芯铝绞线，在沿海等腐蚀地区也采用防腐型钢芯铝绞线、钢芯稀土铝绞线和铜绞线。绝缘导线可以减小线路线间距离，防止相间短路和混线事故，大幅度降低外破故障率，常用的为铝芯交联聚乙烯绝缘导线。集束绝缘导线用于低压架空配电线路，一般采用 2～4 芯平行集束导线。（见配电线路导线）

绝缘子　作用是使导线和杆塔绝缘并承受导线及各种附件的机械荷重。绝缘子按材质分为陶瓷和合成绝缘子，中压架空配电线路常用针式绝缘子、支柱式绝缘子、悬式绝缘子、蝶式绝缘子、瓷横担和瓷拉棒绝缘子。（见配电线路绝缘子）

杆塔　作用是支承导线、避雷线，使导线对地面以及其他设施保持足够的安全距离，并承受导线、避雷线、其他部件和本身的荷重以及冰雪、侧面风的压力等，转角、终端承力杆塔还要承受导、地线的角度张力和不平衡张力，因此，杆塔必须具有足够的机械强度。按其在架空配电线路中的用途可分为直线杆、耐张杆、转角杆、终端杆和分支杆；根据材质可分为钢筋混凝土电杆、铁塔、钢管杆和木电杆，中国常用钢筋混凝土电杆。（见配电电杆）

杆塔基础　用于保持杆塔的稳定性，使杆塔在承载设计条件下的各种受力情况时不倾覆、下陷和上拔。按制作方法可以分为预制钢筋混凝土构件基础、现场浇制基础、深桩基础、掏挖型基础等，钢筋混凝土电杆常用掏挖型基础和预制钢筋混凝土构件基础。

拉线　用于平衡杆塔承受的各种张力，以防止杆塔弯曲、倾斜或者折断，一般由拉线金具、拉线盘和钢绞线组成，可以分为普通拉线、人字拉线、水平拉线、V 形拉线或双拉线。

横担　用于支持绝缘子、导线及柱上配电设备，保持导线间有足够的相间距离，因此，横担要有一定的强度和长度。中国常用的横担为热镀锌角钢和槽钢横担，其他国家也有用木横担的。

金具　用于连接、紧固导线，具备导电、承载、固定功能的金属构件，按其性能和用途大致可分为悬垂线夹、耐张线夹、连接金具、接续金具、保护金具和拉线金具等 6 类。（见配电线路金具）

接地装置　主要作用是导泄雷电流入地，以保持架空配电线路有一定的耐雷水平。包括自然接地和人工接地体两类，自然接地体主要是利用钢筋混凝土电杆和铁塔的自然接地作用，人工接地体则通过合理水平敷设圆钢、扁钢或者垂直敷设角钢、钢管和扁钢并连接而成。

电压等级　各国使用的中压架空配电线路电压等级较多，包括 3，4.16，5，6.3，6.6，6.9，7.2，10，11，12.5，13.8，22（23）kV 等。低压架空配电线路采用的电压与供电方式种类也有多种，如美国有单相三线制的 120/240V，三相四线制的 115/200V，127/220V，266/460V 等；日本有单相三线制的 100/200V、三相四线制的 115/200V 等。中国则以 10kV 作为中压架空配电线路的标准额定电压，也有少部分 20kV 的配电线路，低压架空配电线路采用三相四线制，额定线电压为 380V、相电压为 220V，矿山等配电也有采用 660V 的，制式有三相四线制、三相五线制、单相两线制。（见配电网电压等级）

发展趋势　架空配电线路向绝缘化、紧凑型、自动化、节能型等方向发展。为提高单位线路走廊的配送容量，耐热导线、紧凑型杆塔和多回同杆架设线路将推广使用；为提高供电可靠性，在设计环节充分考虑不停电作业的要求；为减少线路运行损耗，推广应用节能型线路金具材料；为提高抗冰雪、雷害、台风等自然灾害能力，技术上采取了差异化防灾措施等。

jiakong peidian xianlu sheji

架空配电线路设计 (overhead distribution line design)

对架空配电线路的导线、杆塔、杆塔基础和绝缘子等进行合理选型，在优选路径后作出设计并形成设计文件和图纸。它是架空配电线路施工的依据。中、低压架空配电线路一般不架设避雷线，具有档距小、电杆低、线间距离小、导线安全系数大等特点，电杆大多采用钢筋混凝土杆，采用直埋式基础，施工比较方便。

架空配电线路设计必须以设计标准为依据，结合工程气象条件进行，具体内容包括路径选择，导线选择，杆塔选择，档距、弧垂和杆塔高的确定，导线弧垂曲线、线间距离、杆塔基础、绝缘子选择等。

设计标准 各国电力企业均制定有各自的设计标准。在中国，现行的架空配电线路设计标准主要有 GB 50061《66kV 及以下架空电力线路设计规范》和 DL/T 601《架空绝缘配电线路设计技术规程》，城市架空配电线路设计需符合 GB 50293《城市电力网规划规范》的规定。

气象条件 配电线路所在地区风力、覆冰、气温等气象状况。具体数值按照电压越高取值越大的原则。各国对线路适应气象条件的要求不同，采用 5 年一遇直至 50 年一遇的数值不等。中国架空配电线路设计的气温根据当地 15～30 年气象记录中的统计值确定；覆冰厚度在调查基础上可取 0、5、10、15mm 或 20mm；最大设计风速按统计所得的 30 年一遇 10min 平均最大风速。

路径选择 原则与要求：①与城镇规划相协调，与配电网改造发展相结合；②综合考虑运行、施工、交通条件和路径长度等因素；③减少与其他设施的交叉；④跨越弱点线路的交叉角应符合要求；⑤不应跨越储存易燃、易爆物的仓库区域，与甲类生产厂房和库房、易燃易爆物堆场以及可燃或易燃、易爆液（气）体储罐的防火间距应符合国家标准要求；⑥尽量避开洼地、冲刷地带、不良地质地区、原始森林区以及影响线路安全运行的其他地区。

导线选择 包括形式和截面选择两个方面。中国架空配电线路通常采用钢芯铝绞线或铝绞线，市区常用绝缘铝绞线，低压线路也采用平行集束导线，沿海或其他腐蚀较严重的地区亦采用耐腐蚀导线（见配电线路导线）。一般按允许载流量和经济电流密度选择，并通过机械强度、电压降、热稳定等条件校验。导线选择还要符合：①导线发热条件的限制。中国规定交联聚乙烯绝缘导线为 90℃，橡皮绝缘电线线芯长期允许工作温度为 60℃，其他裸铝绞线、钢芯铝绞线和绝缘导线一般为 70℃。许多国家对钢芯铝绞线的温升规定为 70～80℃。②导线电压降的限制。10kV 配电线路，从变电站 10kV 母线到末端变压器或末端配电所的入口允许电压降为变电站二次侧额定电压的 5%，低压配电线路自配电变压器低压侧出口到线路末端（不包括接户线）的允许电压降为额定电压的 4%。③机械强度要求。导线或地线的最大使用张力不应大于绞线瞬时破坏张力的 40%。城市架空配电线路的导线截面，尚需按照各国（地区）供电可靠性的安全准则要求，考虑配电网异常运行情况下导线的转移负荷。

杆塔选择 配电线路的杆塔多用钢筋混凝土电杆，市区通道狭窄处部分使用自立式铁塔和锥形钢管单杆，城镇多采用多回路或高低压同杆塔架设，高低压同杆塔架设要求高电压在上、低电压在下布置，3～10kV 单回路杆塔的导线可采用三角排列和水平排列，多回路杆塔的导线可采用三角和水平混合排列或垂直排列，3kV 以下杆塔的导线可采用水平排列或者垂直排列。杆塔结构构件的承载力设计采用极限状态设计法，即计算荷载效应小于或等于结构计算抗力。

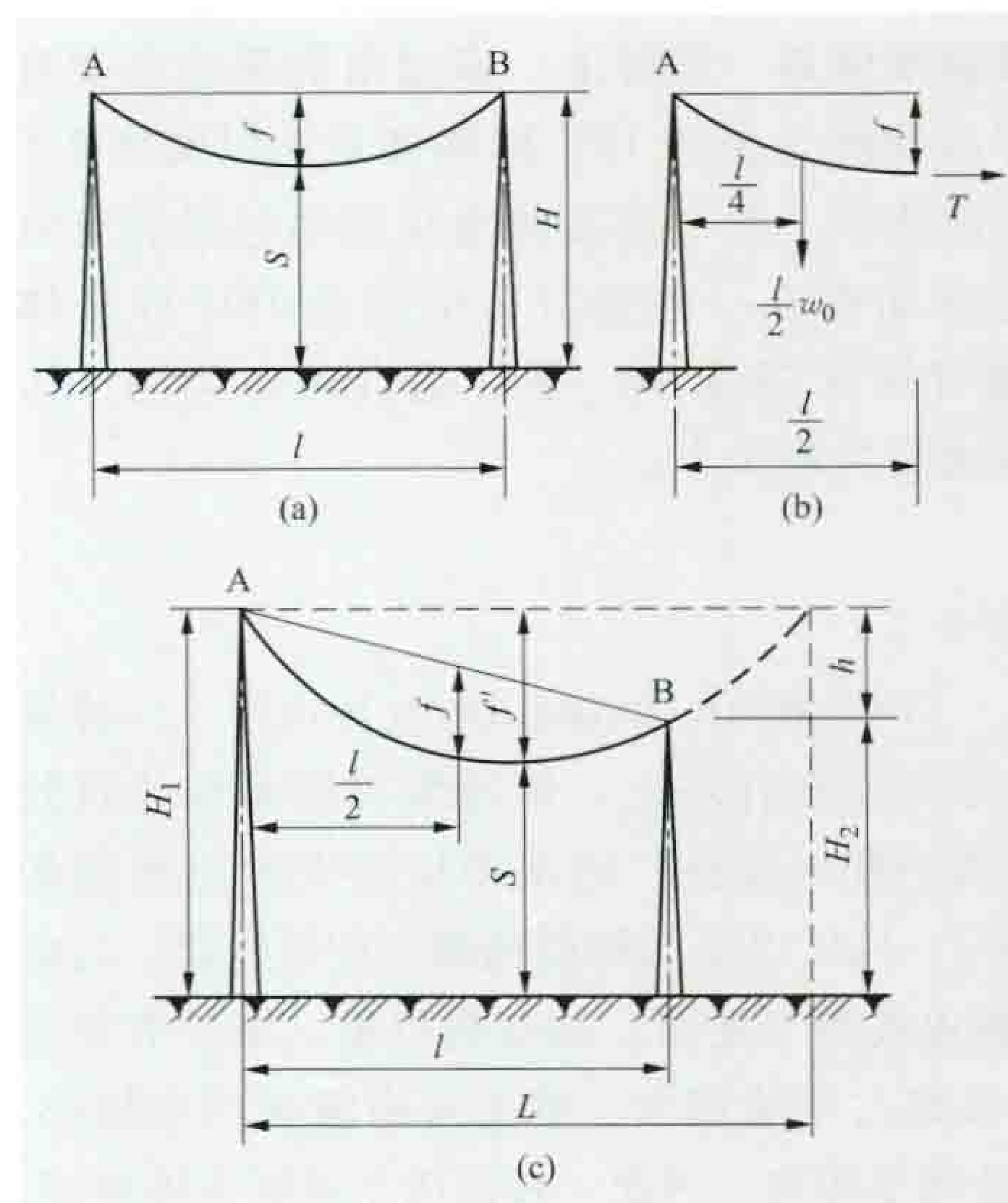


图 1 档距、弧垂、杆塔高度示意图
(a) 悬挂点等高；(b) 弧垂公式图解；(c) 悬挂点不等高

档距、弧垂和杆塔高度的确定 两相邻杆塔之间的水平距离称为档距。档距中导线至两杆塔上导线悬挂点连线之间的最大垂直距离，称为弧垂，见图 1。10kV 及以下架空配电线路的档距需满足表 1 的要求。

表 1 10kV 及以下架空配电线路档距

区域	档距（m）	
	线路电压 3～10kV	线路电压 3kV 以下
市区	40～50	40～50
郊区	50～100	40～60

导线弧垂可按抛物线公式计算，即

$$f=\frac{l^2 w_0}{8T}$$

式中 f 为弧垂，m；l 为档距，m；w_0 为单位长度导线重力，N/m；T 为导线最低点张力，N。

当两悬挂点的高度不等时（高差 h 不超过档距的 10%），导线弧垂最低点不在档距中央，如图 1（c）所示，此时可根据下列关系式求出导线对地的最小距离 S，校验是否满足表 2 要求。

$$H_1=f'+S$$

$$H_2=H_1-h$$

$$f'=\frac{L^2 w_0}{8T}$$

$$L=l+\frac{2Th}{w_0 l}$$

式中 H_1、H_2 为杆塔悬挂点高度，m；S 为导线与地面的最小距离，m。S 的取值标准见表 2。

配电线路的杆塔高度，可以通过档距的改变，在理论上求出每千米造价最低的杆塔高度，称为经济塔高（经济杆高），工程中常取为标准塔高，与此对应的档距，称为标准档距。配电线路实际使用的档距，尚需根据环境条件，导线排列形式，运行、施工、制造、运输等各种技术条件来选定。

导线的弧垂随气象条件变化而变化，气温高，导线膨胀伸长，拉力减小，弧垂变大；导线上覆冰后，单位重量增加，弧垂亦增大，但覆冰时气温降至零度以下，导线收缩，拉力增大，弧垂减小。因此，导线最大弧垂可能发生在最高气温时，也可能发生在最大覆冰时，需根据具体气象条件计算后确定。

表 2 导线与地面的最小距离

线路经过区域	最小距离 S（m）	
	线路电压 3kV 以下	线路电压 3～10kV
人口密集地区	6.0	6.5
人口稀少地区	5.0	5.5
交通困难地区	4.0	4.5

导线弧垂曲线　以档距为横坐标，导线弧垂为纵坐标，根据各种施工气温下的弧垂数据绘制的导线安装曲线。一般每隔 10℃绘一根曲线。各种气温下的弧垂是按抛物线公式计算的，公式中的导线拉力（无风、无冰）是根据架空线最大使用拉力和控制气象条件下的综合负重（导线自重或加冰重后与风负载的合力）代入架空线状态方程式求得的。因此，按曲线上的弧垂施工，可以在运行中保证各种计算气象条件下的导线拉力都不超过设计最大使用拉力，且能使导线对地面和被跨越物之间的安全距离符合设计要求。

线间距离　中、低压架空配电线路各相导线最小线间距离根据运行经验确定。如无可靠数据，导线间距离不应小于表 3 所列。

表 3 10kV 及以下杆塔最小线间距离

线路电压	线间距离（m）								
	档距（m）								
	40 及以下	50	60	70	80	90	100	110	120
3～10kV	0.6 (0.4)	0.65 (0.5)	0.7	0.75	0.85	0.9	1	1.05	1.15
3kV 以下	0.3 (0.3)	0.4 (0.4)	0.4	0.5					

注：() 中为绝缘导线数据。

杆塔基础　中、低压架空配电线路的混凝土电杆基础，以直埋为主，埋设深度见表 4。中国流行一种习惯的估计办法，即电杆埋深为全长的 1/6，其数值与表 4 中的相近，但需进行倾覆稳定验算，直线杆的倾覆稳定安全系数应不小于 1.5。杆塔基础形式根据受力大小及土质情况，有混凝土浇制的梭形基础、阶梯形基础、预制的卡盘基础、桩式基础及用拉线稳定的直埋式基础，如图 2 所示。

绝缘子选择　见配电线路绝缘子。

表 4 电杆埋设深度（m）

杆高	8	9	10	11	12	13	15
埋设深度	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.3

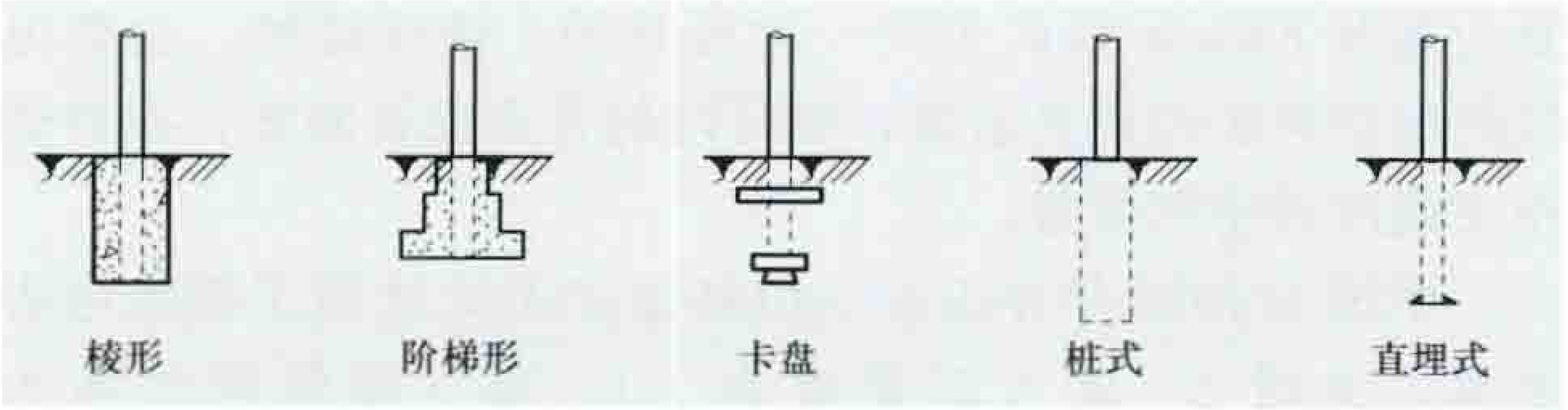


图 2　电杆基础形式

jiakong peidian xianlu shigong

架空配电线路施工　（overhead distribution line construction）　按照架空配电线路设计图纸和工艺规范对架空配电线路的杆塔、杆塔基础、导线和绝缘子等部件进行现场组织安装。中国现行主要施工规范为 GB 50173《电气安装工程 35kV 及以下架空电力线路施工及验收规范》和 DL/T 602《架空绝缘配电线路施工及验收规程》。架空配电线路施工主要包括线路复测，基础施工，塔杆组立，横担、金具和绝缘子安装，导线架设等步骤。

线路复测　线路施工前，施工单位对设计部门已测定线路中线上的各直线桩、杆塔位中心桩及转角塔位桩位置、档距和断面高程，进行全面复核测量。其后，对校测过的杆塔位桩，根据基础类型进行基础坑位测定及坑口放样工作，称为分坑测量。线路复测包括线路杆塔桩复测、施工基面测量和铁塔基础分坑放样等工作。

基础施工　线路杆塔基础的施工作业，主要包括基础挖掘，混凝土基础施工，底盘、卡盘、拉盘的安装等工作。基础挖掘有人力开挖、机械开挖和爆破等方法，除坚硬岩石采用爆破方法以外，大部分基坑采用人力开挖，在城区地下管线无妨碍的坑位或农村施工机具容易到达的坑位，可采用机械螺旋钻挖坑。水泥杆塔基础已基本形成了有底盘、卡盘、拉盘组成的统一规格的部件，多是将其运到施工现场后再装配。铁塔基础由于塔型种类较多，底面积较大，必须根据施工现场地形地质条件和设计基础施工方案进行施工。

杆塔组立　施工方法有机械起吊法、直接起立法、杈杆法、独脚抱杆起吊法、固定式人字抱杆起吊法及倒落式人字抱杆起立法等。①机械起吊法。在交通条件许可的地方，可以用汽车吊或履带式专用吊车立杆。②直接起立法。不用工具，由 4～5 人用肩和手扛起电杆直接立起，适用长度为7～9m 的木杆和轻型水泥杆，如图 1（a）所示。③杈杆法。用杈杆立杆，施工简单，适用长度为 10m 以下的木杆及轻型水泥杆，如图 1（b）所示。④独脚抱杆起吊法。适用于起吊荷重在 30kN 以下，场地受到限制不能设置人字抱杆及牵引制动装置的场合，如图 1（c）所示。⑤固定人字抱杆起吊法。起吊荷重比独脚抱杆大，抱杆稳定，容易操作，如图 1（d）所示。⑥倒落式人字抱杆起立法。起吊时抱杆不是立起固定的，而是随着总牵引钢丝绳的收紧而使抱杆徐徐起立，同时使电杆竖起，如图 1（e）所示。倒落式人字抱杆法可以起吊单杆、双杆及铁塔，抱杆的高度为杆塔中心的 0.8～1 倍，但施工场地较大，主要在开阔地区高压配电线路及输电线路整体组立双杆时应用。

横担、金具和绝缘子的安装　将横担、金具和绝缘子等部件按设计图纸要求安装、调整并固定准确，为导线固定和架设做好准备。

导线架设　将导线展放并架设在杆塔上的施工作业，包括架线前准备工作、放线、导线连接、紧线和导线弧垂观测工作。

（1）架线前准备工作包括工作分工、线盘的支设、放线滑轮的悬挂、跨越架的搭设、通信联络、放线牵引力估算和设置临时拉线工作。

（2）放线。常用的放线方法有地面放线法、张力放线法和线引线放线法 3 种。①地面放线法。利用人力或畜力沿线

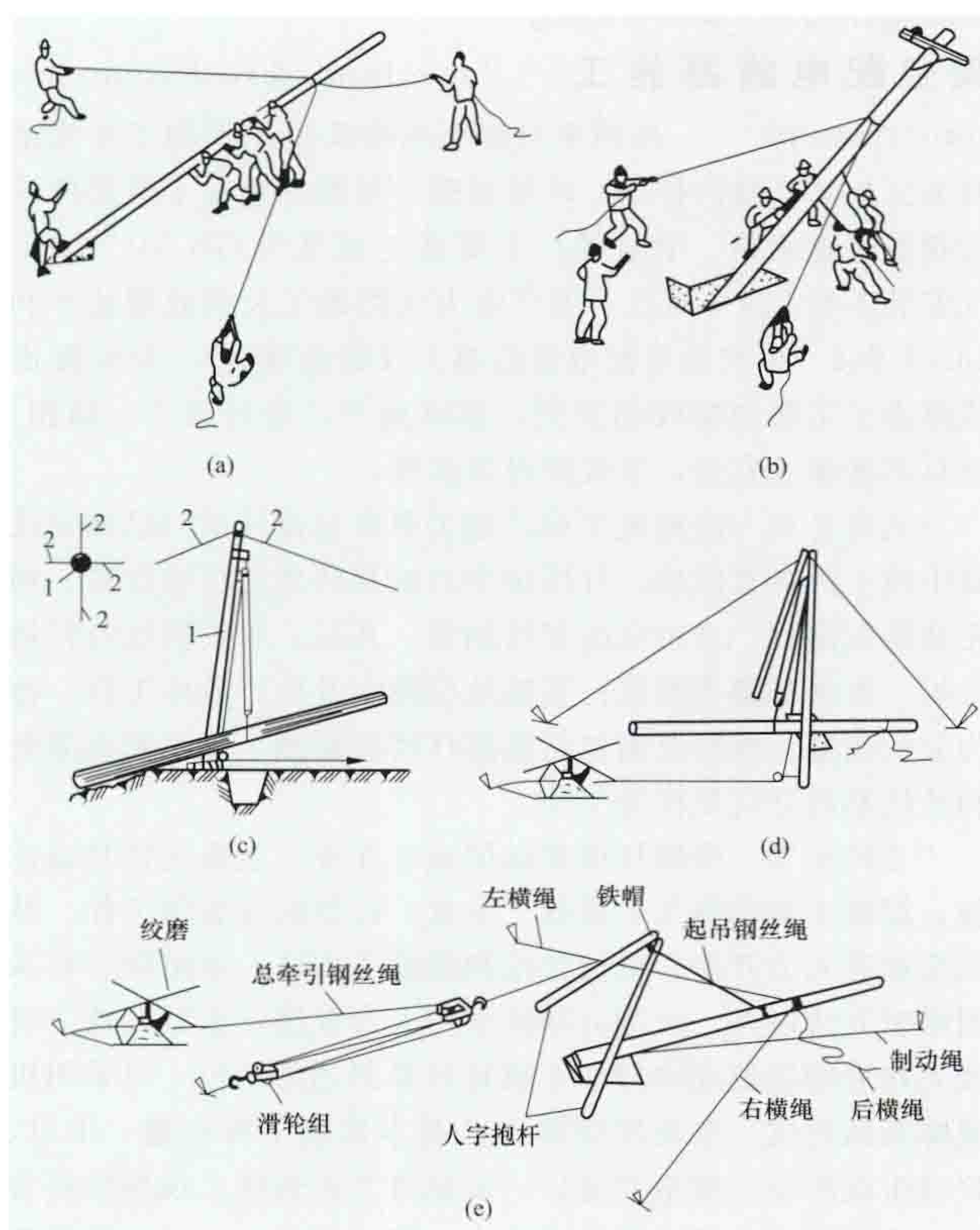


图 1　立杆方法示意图

(a) 直接起立法立杆；(b) 杈杆法立杆；(c) 独脚抱杆起吊电杆；(d) 固定式人字抱杆立杆；(e) 倒落式人字抱杆立杆

路直接放线，当沿线路地形条件许可时，可采用汽车或拖拉机牵引放线。②张力放线法。用牵引绳以一定张力牵引导线通过各基杆塔上安装的放线滑轮，导线可以不着地放线。张力放线法比较复杂，一般应用在高压配电线路以及重要交叉跨越处，如跨越铁路、通航河流、主要通信线、电力线等。③线引线放线法。一种是预放牵引线，另一种是利用原线调放新线，这一方法类似张力放线，在配电线路大修更换导线时应用广泛。

(3) 导线连接。包括绑接法、编接法、绑缠法、线夹连接法、钳压法、爆炸压接法等，截面较大时宜采用后两种方法。

(4) 紧线。按照设计的弧垂或相应的拉力将放好的导线收紧。紧线方法是先把导线一端固定在紧线区间（一般即为耐张段长度）起点耐张杆塔的耐张绝缘子金具上，然后在终点紧线端用人力或机械设备牵引导线的另一端，直到观测档（紧线区间中选择档距较大、高差较小的档距作为弧垂观测档）的弧垂达到设计值后，再把导线固定在终点耐张杆塔的耐张金具上。

(5) 导线弧垂观测。观测档的弧垂值，对孤立档（紧线区间无支线杆，仅两基耐张杆塔组成一档）可按照施工时的气温值直接从设计弧垂曲线中查得；对高压配电线路采用悬式绝缘子的连续档（紧线区间有直线杆组成各档），因地形条件限制，各档档距长度不完全相同，施工弧垂应按下式计算，即

$$f = f_k\left(\frac{l}{l_k}\right)^2$$

$$l_k = \sqrt{\sum l_i^3 / \sum l_i}$$

式中 f 为观测档施工弧垂，m；f_k 为代表档距的弧垂（可按代表档距的大小从弧垂曲线上查得），m；l 为观测档档距，m；l_k 为代表档距（为了简化计算，各连续档距用等价的孤立档距代表）的长度，m；$\sum l_i^3$ 为耐张段中各档档距立方之和，m^3；$\sum l_i$ 为耐张段长度，m。

配电线路的弧垂观测方法，通常使用等长法，或称平行四边形法，见图 2，即在被观测的两杆塔上各挂一长度等于弧垂的弧垂尺，观测人员在杆塔上用眼观看弧垂尺形成 A′B′视线，然后收紧或放松导线，使档距中央的导线与 A′B′视线相切，则导线的弧垂值即为正确弧垂值。

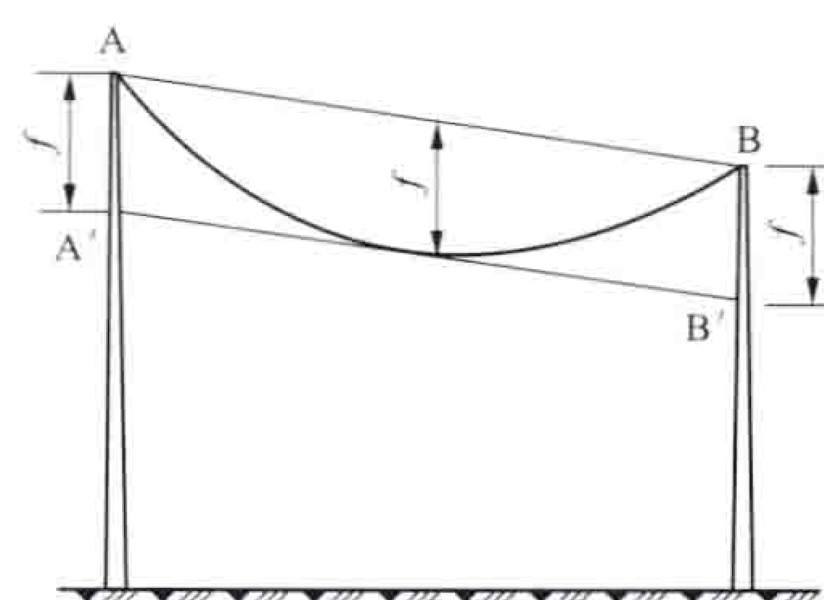


图 2　平行四边形法观测弧垂

jiaxian dianli kache

架线电力卡车　(overhead contact electric truck)

从架空接触网获得电源，向牵引电动机供电将电能转换为机械能，以驱动卡车并获得不同的运行速度的无轨运输设备。当架线电力卡车用于斜坡巷道运输矿石和材料时，由于该卡车的用电是通过架空接触网引自供电系统，因而，能源利用率高，过载能力强，运行中噪声低，无烟气等有害气体对环境的污染。另外，由于该卡车为四轮驱动，在 12% 的坡道上能以 20km/h 的速度满载运行。

从电力拖动方式上分直流拖动和交流拖动两种，已投运的直流拖动电力卡车接线如图 1 所示。

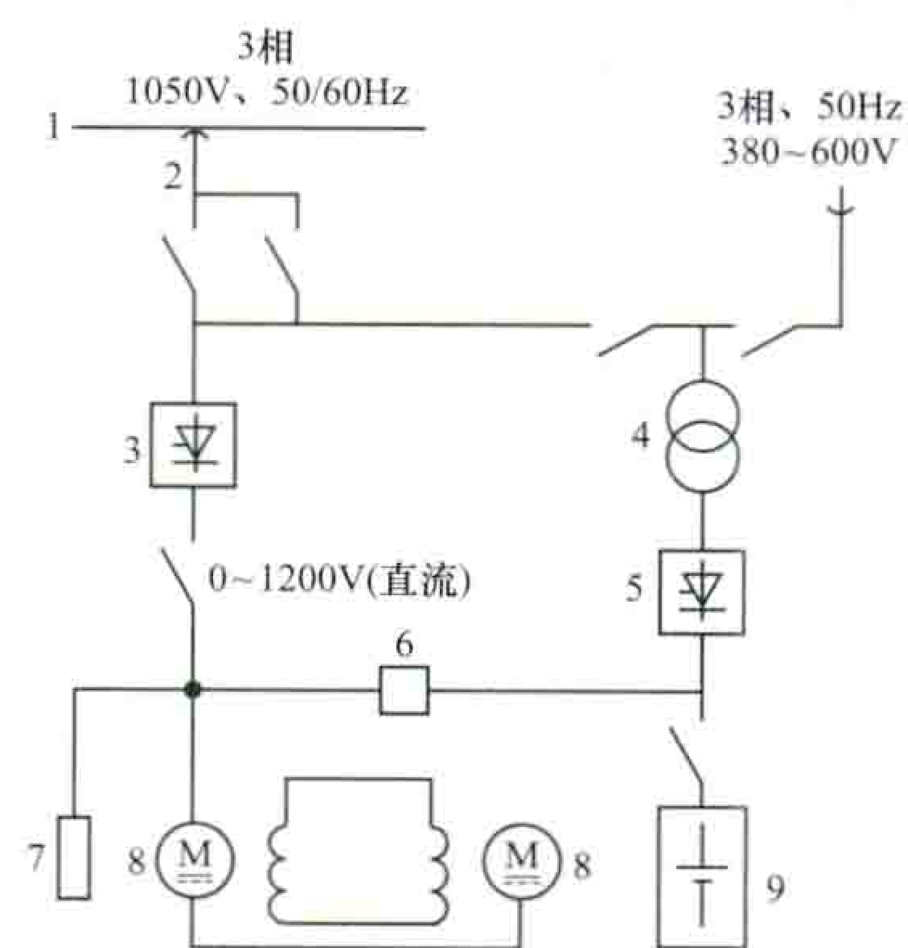


图 1　直流拖动电力卡车接线图

1—架空接触导线；2—受流器；3，5—晶闸管变流器；4—变压器；6—晶闸管控制器；7—能耗制动电阻；8—直流牵引电动机；9—蓄电池

该卡车均为后部倾卸车，两个电动机被直接耦合到前后轮的分速器上，油冷却盘型制动器起动、制动平稳。

在离开接触网运行期间，由镍铬电池供电，以驱动电动机运行。在返回接触网后镍铬电池经 600V 或 380V 交流插座自动充电。该镍铬电池能保持卡车以 5km/h 的速度脱离架空接触网运行 50～100m。

架线电动卡车的发展始于 1981 年。开发此项目的目的是为瑞典 Kiruna 铁矿生产一种可靠的、高性能的、全部电气化的斜井矿石提升系统，使每吨的开采投资降低，在巷道中又能改善空气质量。

中国于 1998 年在山东三山岛金矿正式使用了架线电力卡车，见图 2。该卡车载重为 35t，架空接触网电压为 690V、50Hz，电动机为交流绕线型，每台电动机功率

200kW，运行距离 2300m，坡度 12%，运行速度为 15km/h，最高时速可达 18km/h，体现了架线电力卡车所具有的长处。



图 2 运行中的 35t 架线电力卡车（李临明 提供）

架线电力卡车尚处于发展阶段，仅使用于无爆炸气体与无烟尘的斜坡巷道运输，特别是为地下开采延伸运输提供了一个新型的运输方式。

jianxing xudianchi

碱性蓄电池 (alkaline battery) 使用苛性钾或烧碱等碱性水溶液为电解液的蓄电池。由负极活性物质铁、镉、锌、氢及正极活性物质氢氧化镍、氧化银、氧（空气）可组成镉-镍、铁-镍、锌-银、镉-银、锌-空气、氢-镍蓄电池等多种碱性蓄电池。碱性蓄电池的放电特性、低温特性、寿命、完全密闭性等都优于铅酸蓄电池，但价格较贵。

碱性蓄电池正、负极的充、放电反应见表 1，各种碱性蓄电池充、放电反应见表 2。

表 1 碱性蓄电池正、负极充、放电反应

电极	种类	充、放电反应
正极	氢氧化镍	$NiOOH+H_2O+e \rightleftharpoons Ni(OH)_2+OH^-$
	氧化银	$2AgO+H_2O+2e \rightleftharpoons Ag_2O+2OH^-$ $Ag_2O+H_2O+2e \rightleftharpoons 2Ag+2OH^-$
	空气	$O_2+H_2O+2e \rightleftharpoons HO_2^-+OH^-$ $O_2+2H_2O+4e \rightleftharpoons 4OH^-$
负极	铁镉锌	$Fe+2OH^- \rightleftharpoons Fe(OH)_2+2e$ $Cd+2OH^- \rightleftharpoons Cd(OH)_2+2e$ $Zn+2OH^- \rightleftharpoons Zn(OH)_2+2e$

表 2 碱性蓄电池充、放电反应

种类	充、放电反应	开路电压 (V)
镉-镍蓄电池	$2NiOOH+Cd+2H_2O \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2+Cd(OH)_2$	1.329
铁-镍蓄电池	$2NiOOH+Fe+2H_2O \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2+Fe(OH)_2$	1.397
锌-银蓄电池	$2AgO+Zn+H_2O \rightleftharpoons Ag_2O+Zn(OH)_2$ $Ag_2O+Zn+H_2O \rightleftharpoons 2Ag+Zn(OH)_2$	1.815 1.589
镉-银蓄电池	$2AgO+Cd+H_2O \rightleftharpoons 2Ag+Cd(OH)_2$ $Ag_2O+Cd+H_2O \rightleftharpoons 2Ag+Cd(OH)_2$	1.379 1.153
锌-空气蓄电池	$O_2+2Zn \rightleftharpoons 2ZnO$	1.646
氢-镍蓄电池	$\frac{1}{2}H_2+NiOOH \rightleftharpoons Ni(OH)_2$ $MH+NiOOH \rightleftharpoons M+Ni(OH)_2$	1.319 1.2

碱性电解液在电池充、放电反应过程中不直接参与反应是碱性蓄电池的一大特征，也是其电气特性、低温特性、寿命等优异的基本原因。

镉-镍蓄电池与铁-镍蓄电池 分别简称镉电池（Cd 电池）、铁电池（Fe 电池），其负极活性物质分别为镉、铁，正极活性物质为镍。除负极活性物质不同外，两种蓄电池在很多方面都相似。

结构 由极板、隔板、电解液、电解槽等组成。从电池槽的形式，可分为开放式和密封式两种。把在充电过程中正极产生的氧引到镉电极上使其消失，是制成完全密封式镉-镍蓄电池的基础。

（1）极板。镉-镍、铁-镍蓄电池的极板有管式、袋式、烧结式 3 种。管式极板只作正极用，在钢带上开有许多小孔，卷制成管，并在管中充填正极活性物质，多管并列装在镀镍钢制框架上即成为极板。袋式极板用作铁-镍蓄电池的负极板和镉-镍蓄电池的正极板，在薄钢带上打出很多针孔，镀镍后制成袋，充填活性物质，多袋并列装在镀镍钢框架上即成为极板。烧结式极板可作正极板或负极板使用，以镍网或多孔薄镍板或不锈钢多孔薄板为基板，将镍、铜、铁等金属粉末烧结在基板上，即成烧结式极板。烧结式极板孔率及表面积大，导电性及机械强度好，已在各种镉-镍蓄电池中得到广泛应用。

（2）隔板。多用微孔性尼龙、聚丙烯、聚乙烯醇等合成树脂薄膜制成。隔板应耐碱、电阻小、机械强度高而柔软，保持电解液的性能良好。烧结式碱性蓄电池对隔板的要求更为严格。

（3）电解液。管式、袋式、烧结式极板蓄电池的电解液都是密度为 1.20～1.30g/cm^3（20℃）的苛性钾或烧碱溶液。

（4）电池槽。通常使用不锈钢、镀镍钢板制造大型电池槽，用尼龙、聚乙烯等高分子化合物制造小型电池槽。一般电池槽盖用高强镀镍钢板制造，盖上除接线柱外，还装有带自动阀的排气、注液栓。密封式蓄电池的容器要有很高的机械强度，并设计有安全阀，防止电池内压力异常高时破坏电池。

电池特性 主要有充电特性、放电特性、温度特性、自放电特性等。

（1）充电特性。铁-镍蓄电池开始充电时电压即可升到 1.6V，同时产生氢气，升到 1.8V 后变为恒定，同时充电结

束。镉-镍蓄电池开始充电时电压可升到1.4V，在升到1.5V以后仍缓缓上升，且不产生气体，充电效率很好。管式、袋式、烧结式极板的蓄电池的充电特性基本上是一样的。密封式镉-镍蓄电池和同类的开放式蓄电池的充电特性不同。充电时，在正极上产生的氧被负极消耗掉，在1.5V就能建立起电化学上的平衡、稳定状态。不论哪一种电池，其充电特性都随充电电流、温度条件等变化。图1所示为镉-镍蓄电池和铁-镍蓄电池的充、放电特性比较。

(2) 放电特性。碱性蓄电池的容量随活性物质量及其利用率、放电率、电解液浓度、温度条件的不同而不同。正极活性物质的利用率为70%，镉负极活性物质的利用率为75%～85%，铁负极活性物质的利用率较镉负极的低。

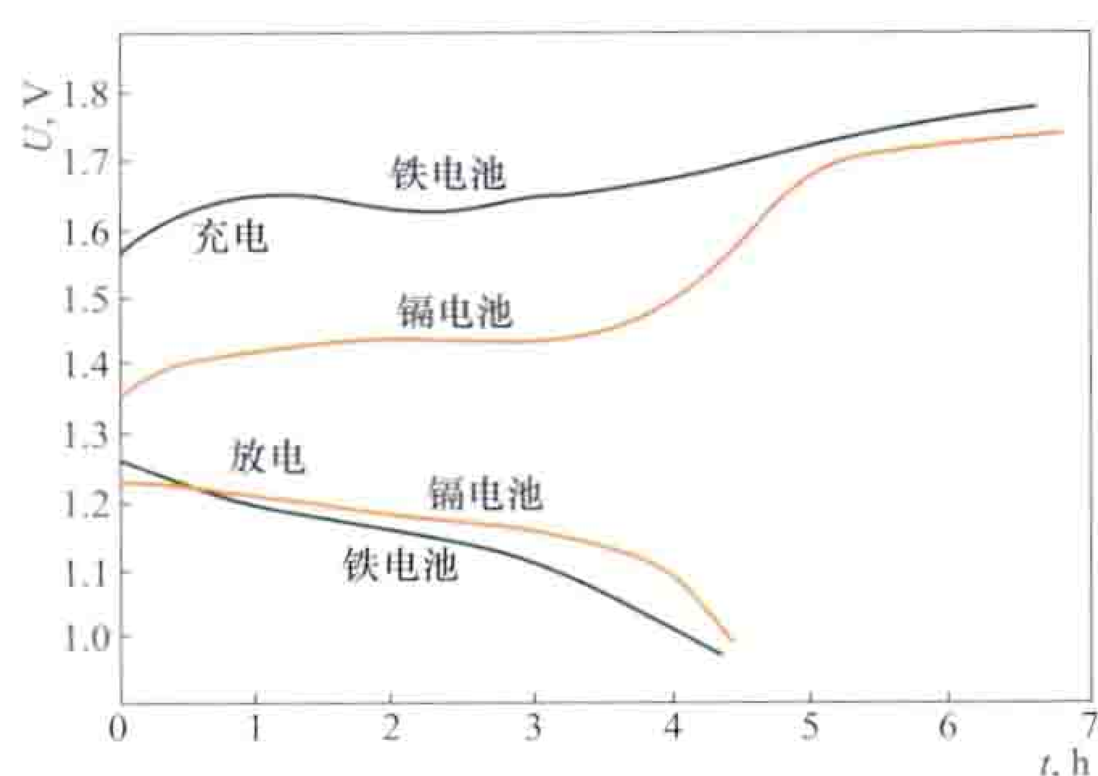


图1 镉-镍蓄电池和铁-镍蓄电池的充、放电特性比较

烧结式电极的电池，其活性物质利用率，正极为90%，负极为65%～75%。密封式电池的电解液量少，内阻较大，是其放电特性稍差的原因。与所有电池一样，大电流放电都将降低电池的放电容量。

(3) 温度特性。一般说来，温度降低时，电池内阻增大，电解液黏度增加，降低了离子扩散速度，电池容量也随之降低。温度高时则相反。铁-镍蓄电池在－20℃时的容量仅为25℃时容量的10%，镉-镍蓄电池的容量在相同温度条件下约为70%。因此，铁-镍蓄电池不能在低温下使用，镉-镍蓄电池可以在－40～50℃的范围内使用。烧结式电极的电池的高、低温特性优异，可在－50～75℃的范围内使用。密封式镉-镍蓄电池的温度特性优异，可在－40～60℃的范围内使用。

(4) 自放电特性。电极不稳定，电解液中杂质在电极上发生的局部反应称为自放电。它可引起电池容量的下降。温度升高，自放电随之增大。碱性蓄电池自放电很小，可以长期放置。铁-镍蓄电池的稳定性较镉-镍蓄电池的差，其自放电要显著得多。镉-镍蓄电池在－20℃以下几乎不发生自放电，但在25℃时，一年后剩余容量降到原容量的80%。密封式镉-镍蓄电池的自放电量较开放型的要大，每日约0.7%。

寿命　碱性蓄电池在充、放电时，电解液不参与反应，电池机械强度、电气强度大，因此寿命很长。镉-镍蓄电池的寿命为500～2000周期（8～25年），铁-镍蓄电池的寿命为2000～4000周期（7～25年）。

用途　碱性蓄电池耐振性强、电气强度高，可以在苛刻的条件下长期使用。

管式极板电池寿命最长，适用于缓放电场合；袋式电极的电池广泛用于缓放电的一切情况。这两类电池多用于列车用电源，汽车、汽油机、柴油机的起动，电动车辆的动力电源，矿山安全灯的电源，固定用电源，应急电源，通信器械用电源等。

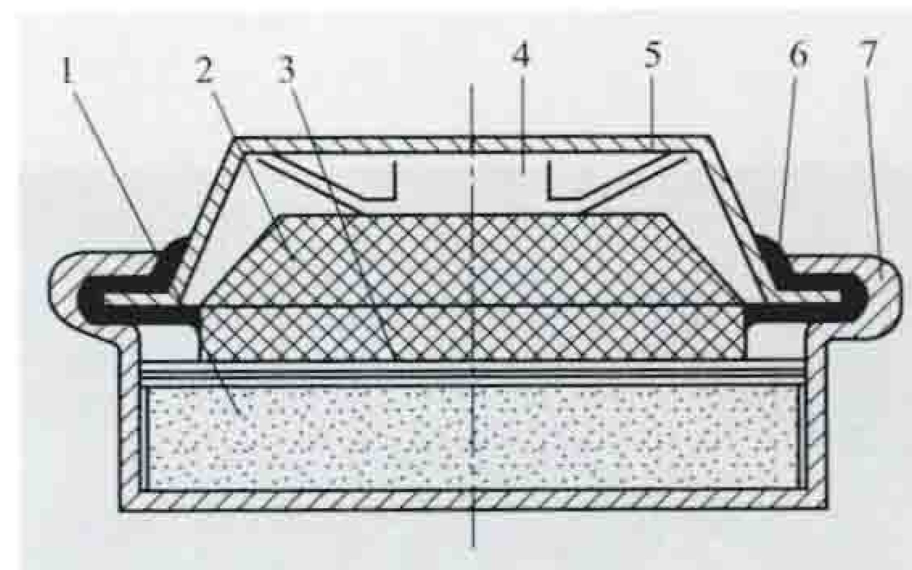


图2 密封式扁平镉-镍蓄电池剖面图

1—正极；2—负极；3—隔板；4—弹簧；5—盖；6—绝缘环；7—容器外壳

烧结式电极的电池高放电率特性好、低温性能优越，使用范围广泛。标准型的多用于摄影机、器械操作备用电源、发动机起动电源、变换器电源。大电流放电电池多用于变换器电源、发动机起动电源、器械操作备用电源、瞬时负荷电焊机电源。

密封式镉-镍蓄电池剖面见图2，其特性优异，不产生气体，不漏液，维修保养简便，因而用途极广，主要用于电动牙刷、电动剃须刀、真空吸尘器、电动工具、剪刀、手提式电灯、应急照明灯、紧急导航灯、晶体管收音机、携带式电视接收机、助听器、无线电收发报机、手提式摄像机、打字机、袖珍电子计算机、人造卫星、频闪观测器、放映机、火灾报警器等。

锌-银蓄电池　负极活性物质为锌，正极活性物质为过氧化银（AgO）、氧化银（Ag_2O）的碱性蓄电池。锌-银、镉-银蓄电池总称银电池，其化学反应式见表1及表2。

结构　正极为微孔性银，负极板为附着在银丝或银网上的膏状海绵状锌或氧化锌。隔板必须使用孔径非常小的材料，常用再生纤维素膜、离子交换树脂膜、辐射聚乙烯膜等。在全密闭型电池中电解液量很少，仅能浸湿极板和隔板。电池槽一般使用金属或塑料制作。锌-银蓄电池的结构示意图见图3。

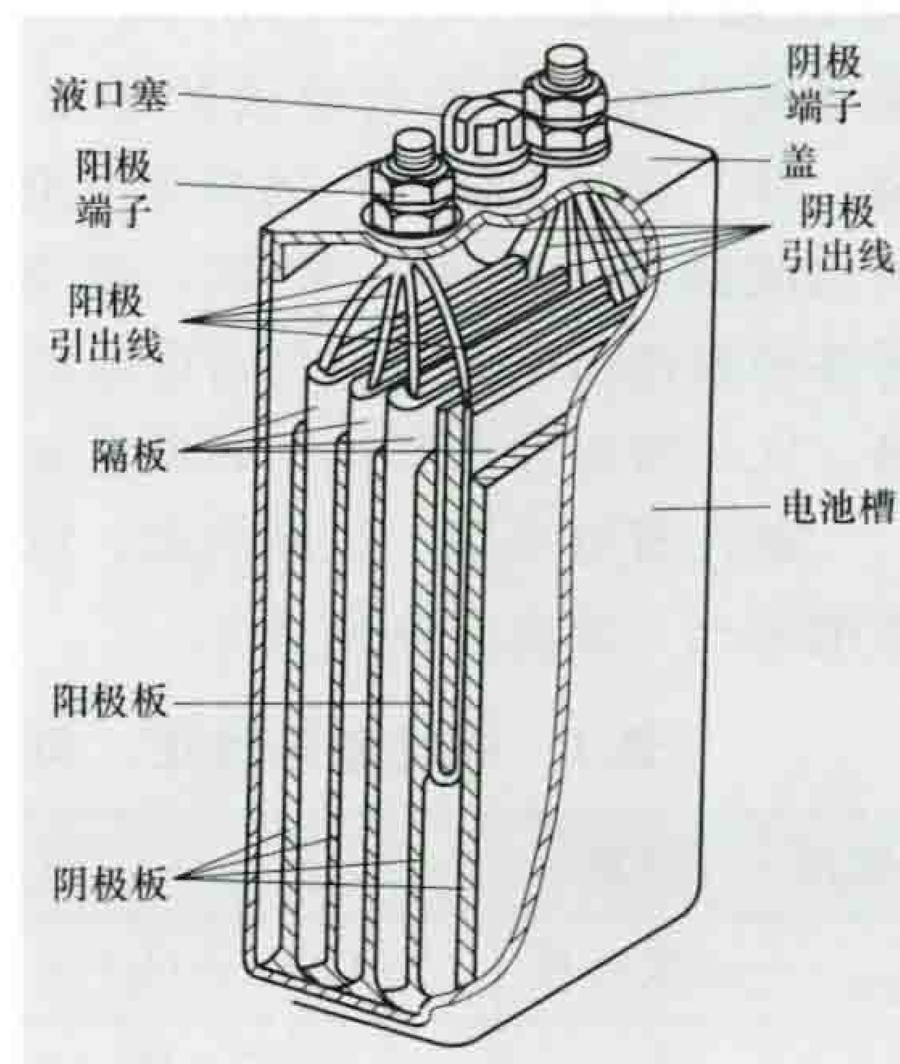


图3 锌-银蓄电池结构示意图

电池特性　锌-银蓄电池的充、放电特性见图4及图5。电池放电时，银正极逐渐变成金属银，正极电阻减少，因此，即使高放电率放电，其端电压也能保持一定。锌-银蓄电池的使用范围及主要性能参数见表3。

锌-银蓄电池的比能量、比功率等性能均优于铅酸蓄电池、其他碱性蓄电池，可用于导弹、运载火箭、鱼雷、返回式卫星等特殊要求的军事、宇航设备上。在民用方面，新闻摄影、电视摄像、便携式通信机、步话机等也广泛使用锌-银蓄电池。

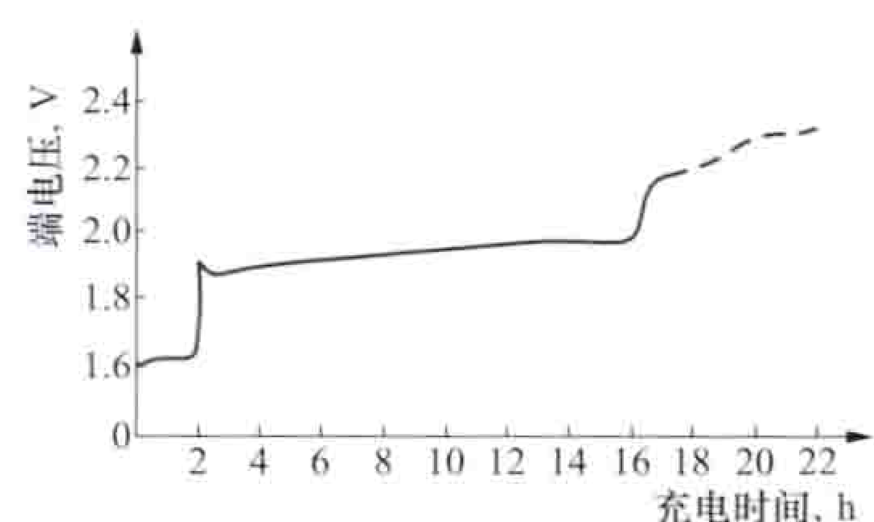


图4 锌-银蓄电池充电特性曲线

镉-银蓄电池　负极活性物质为镉，正极活

性物质为过氧化银（AgO）、氧化银（Ag_2O）的碱性蓄电池。镉代替了锌-银蓄电池中的锌，使电池寿命延长，自放电减少。在全放电的情况下，寿命可达300～500周期；在部分放电的情况下，寿命可达3000周期，不论在充电或放电状态都可长期保存。电池的化学反应见表1及表2。

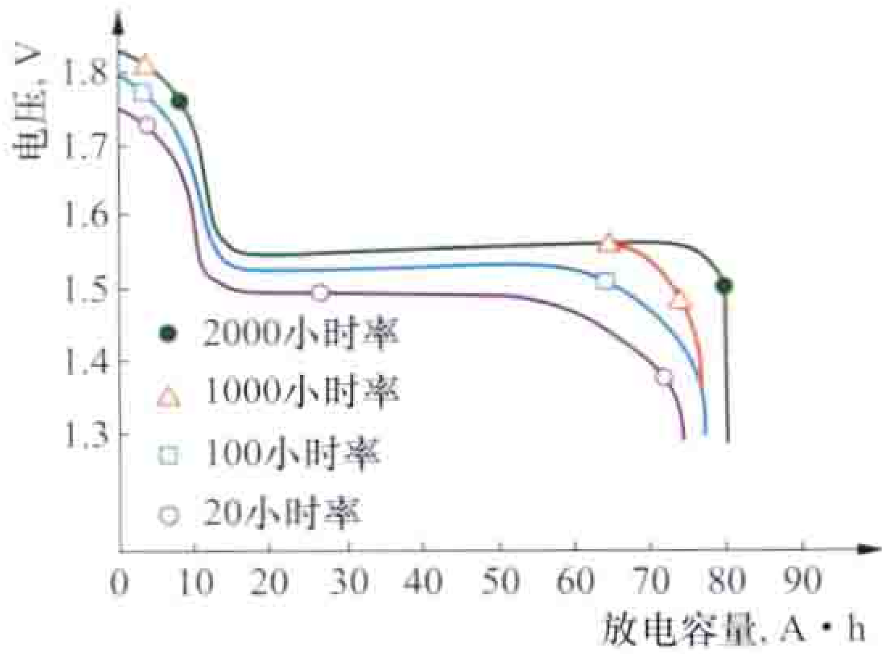


图5 锌-银密封式蓄电池放电特性曲线（25℃）

结构 正极为微孔性银，负极板与镉-镍蓄电池的负极板相同，有烧结式和涂膏式两种。烧结式极板是把羰基镉粉在镍网上烧结、活化而成。涂膏式极板是把镉粉、氧化镉、氢氧化镉的混合物填涂在银或镍的丝网板栅上制成的。隔板是提高电池性能和延长电池寿命的重要零件，为保持电解液多用尼龙、聚丙烯、再生纤维等，为防止氧化银移向负极，则常用赛璐玢、辐射聚乙烯、离子交换膜等。电池槽多用ABS树脂、混合型的共聚合树脂等刚质材料制作。

电池特性 镉-银蓄电池的充、放电特性和锌-银蓄电池的极其相似，表4中列出了镉-银蓄电池的使用实例和主要性能参数。

金属-空气蓄电池 负极活性物质为金属，正极活性物质为空气中的氧，电解质为苛性钾水溶液的高能蓄电池，实际应用的只有锌-空气蓄电池。早在1917年，法国人Ch. 费里即已研制成功锌-空气一次电池（见原电池），但当时的锌-空气蓄电池在充电时极板即破坏，不能成为二次电池。

锌-空气蓄电池的正极（空气极）应用燃料电池中的空气极，是烧结镍粉制得的薄型多孔性金属电极，它不仅大大提高了放电电流密度，而且克服了锌-空气一次电池的碳电极在充电时丧失机械强度的问题。负极（锌板）采用多孔性锌，克服了一次电池铸造锌电极在充电时产生的难以恢复的树枝状锌的问题。此外，还增设了一次电池中所没有的、以氧化铝或硅制成的、锌离子不能透过的隔板，从而提高了电池的性能。电解液固定式锌-空气蓄电池的结构见图6。其特点是：①多孔性锌负极被多孔性隔板包围，放电时不会在电解液中消耗掉；②电解液吸附在多孔性隔板和多孔性锌负极上；③利用空气中的氧作氧化剂，空气极带有导电金属网和催化剂，可以进行充、放电；④设置了隔板，防止充电时产生树枝状结晶锌在正极上生长造成电池内部短路。

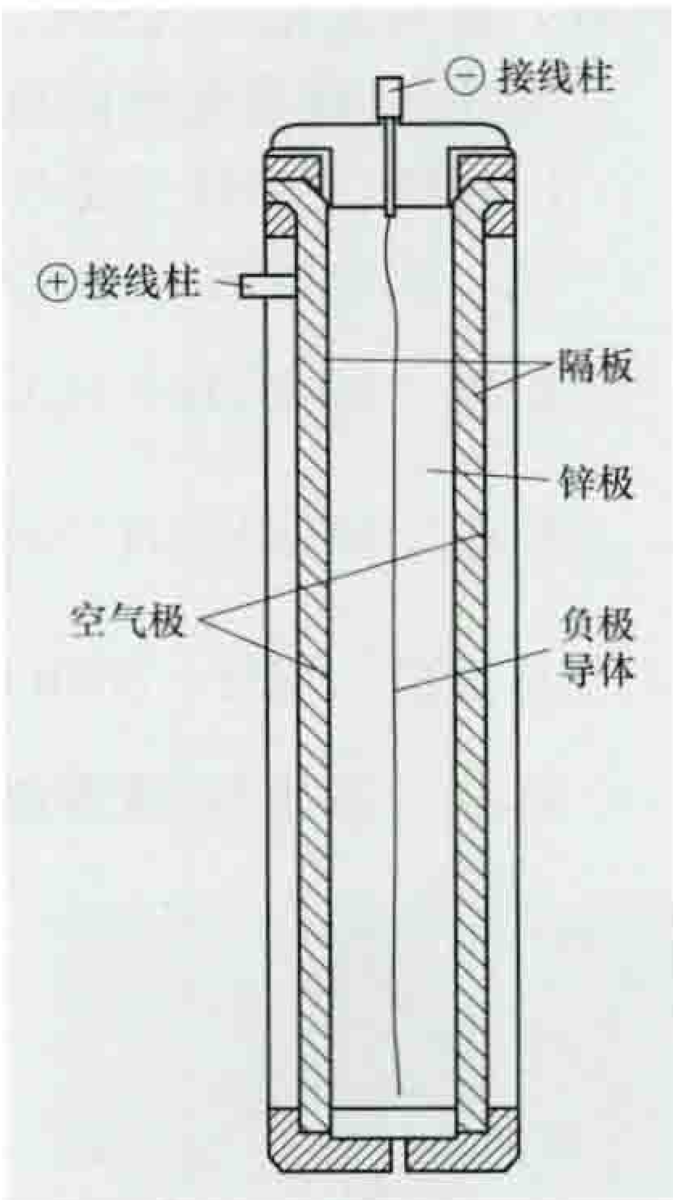


图6 电解液固定式锌-空气蓄电池结构

锌-空气蓄电池的理论质量比能量可达1350W·h/kg，实际值已达230～300W·h/kg，具有功率高、比能量大、使用方便、价格低廉的优点。但由于锌在碱性电解液中的电化学活性大，热力学性质不稳定，空气电极可逆性差，电解液受环境影响大的缺点，锌-空气蓄电池的应用有限。

氢-镍蓄电池 正极为氢氧化镍，负极为氢电极，苛性钾或烧碱等碱性水溶液为电解液的蓄电池。氢-镍蓄电池分为高压氢-镍蓄电池和低压氢-镍蓄电池。高压氢-镍蓄电池的氢电极为H_2。低压氢-镍蓄电池的氢电极为金属氢化物，所以又称金属氢化物-镍蓄电池。高压氢-镍蓄电池是镉-镍蓄电池技术和燃料电池技术相结合的产物，正极就是镉-镍蓄电池用的氢氧化镍电极，负极是燃料电池用的氢电极，气体电极与固体电极共存是高压氢-镍蓄电池的特点。充电后，高压氢-镍蓄电池负极活性物质氢气的压力在3～5MPa之间，这是它被称为高压氢-镍蓄电池的原因。

高压氢-镍蓄电池的电化学式为

表3 锌-银蓄电池的使用范围及主要性能参数

使用实例	电压(V)	容量(A·h)	质量比能量(W·h/kg)	体积比能量(W·h/L)	循环寿命(周期)	寿命(年)
潜艇	26～250	20～115	67	96	5～10	
导弹	6～60	1～100	89	128	5～10	
飞机	24～30	15～100	93	135	6～100	
通信电源	12～30	0.5～300	100	142	10～150	
人造卫星	1.5～35	1～15	100	142	50～150	
电视摄影机	3～30	1～10	89	142	5～100	
应急照明	7～10	18～40	110	160		1
拖拉机、卡车起动电源	10～21	15～120	80	88		1
电动汽车动力源	48～60	256～300	110	160	200～400	

表4 镉-银蓄电池的使用实例和主要性能参数

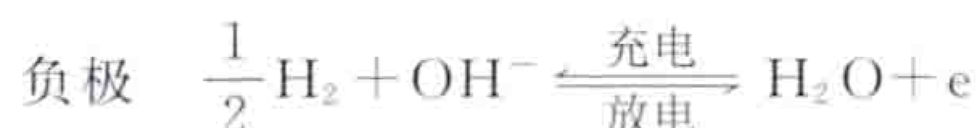
使用实例	电压(V)	容量(A·h)	质量比能量(W·h/kg)	体积比能量(W·h/L)	循环寿命(周期)	寿命(年)
飞机	20～24	18～85	56	83	100～200	2～3
携带式通信机	1.1～28	0.1～300	67	115	500～700	
人造卫星	6～28	1～300	67	142	500～1000	
照相机	3.2～30	1～10	56	115	300～500	
应急照明	7～10	18～40	67	128		2～3
应急电力	7～10	20～300	67	128		2～3
矿灯	1.1～4.5	3～18	67	115	300～500	
电子钟表	20	3	67	128	300～500	
医疗器械	1～6	3～21	67	135	300～700	
拖拉机、卡车起动电源	20～24	18～85	56	83	100～200	
电动汽车动力源	48～60	300	67	135	500～1000	

⊖Pt，H_2 | KOH（或 NaOH） | NiOOH⊕

充、放电时的电池反应为



正极 $NiOOH+H_2O+e \xrightleftharpoons[放电]{充电} Ni(OH)_2+OH^-$



负极 $\frac{1}{2}H_2+OH^- \xrightleftharpoons[放电]{充电} H_2O+e$



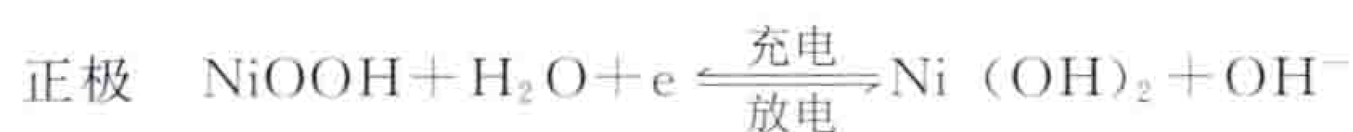
总反应 $\frac{1}{2}H_2+NiOOH \xrightleftharpoons[放电]{充电} Ni(OH)_2$

低压氢-镍蓄电池以能够可逆地吸放氢的金属氢化物为负极，金属氢化物又称贮氢合金，以 MH 表示。

低压氢-镍蓄电池的电化学式为

⊖MH | KOH（或 NaOH） | NiOOH⊕

充、放电时的电池反应为



正极 $NiOOH+H_2O+e \xrightleftharpoons[放电]{充电} Ni(OH)_2+OH^-$



负极 $MH+OH^- \xrightleftharpoons[放电]{充电} M+H_2O+e$



总反应 $MH+NiOOH \xrightleftharpoons[放电]{充电} M+NiOOH$

结构 高压氢-镍蓄电池的氢气密封贮存在整个单体电池的壳体中，壳体要能有效地贮存气体，又要承受相当大的气压，因此，壳体选择两端呈现半球状的圆柱筒体，其结构如图 7 所示。单体电池的基本组成为压力容器、氢氧化镍电极、氢电极、隔膜和电解液等。压力容器一般采用高强度的镍基合金，强度大，抗氢脆和抗应力腐蚀能力强，能承受压力变化；氢氧化镍电极和镉-镍蓄电池中的相似，所不同的是，高压氢-镍蓄电池的镍电极采用电化学浸渍；氢电极与燃料电池的氢电极结构基本相同；隔膜有石棉膜和氧化锆布等；电解液一般为密度等于 $1.3g/cm^3$ 的 KOH 水溶液，有时添加一定量的 LiOH。

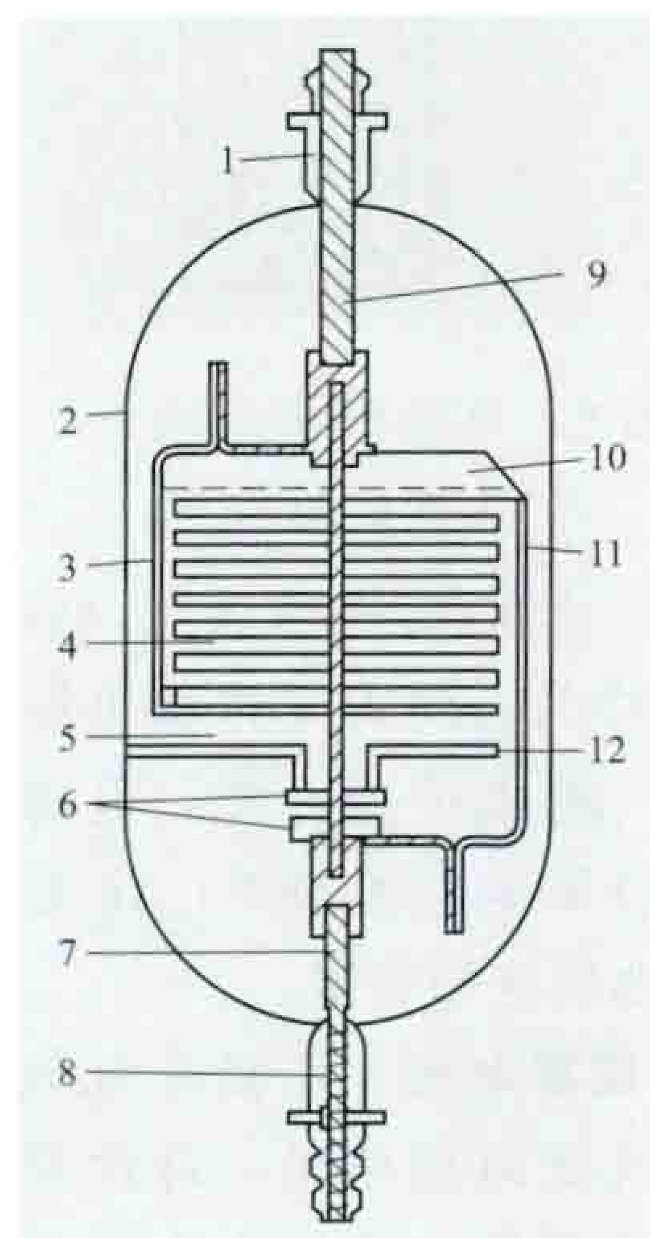


图 7 高压氢-镍蓄电池结构

1—密封件；2—压力容器；3—正汇流排；4—电极组；5—下压板；6—绝缘垫圈；7—负极柱；8—注入孔；9—正极柱；10—上压板；11—负汇流排；12—焊接圈

低压氢-镍蓄电池的结构与镉-镍蓄电池基本相同，可以根据需要做成圆柱形、扣式及矩形等形状，组成部分主要有氢氧化镍正极、金属氢化物负极、无纺布隔膜及碱性电解质，金属氢化物主要有 MgH_2，Mg_2NiH_4，VH_2，$TiFeH_{1.95}$，$LaNi_5H_6$，$ZrMn_2H_{3.6}$ 等。

电池特性 主要包括充、放电特性，电动势，容量，寿命等。

（1）充、放电特性。高压氢-镍蓄电池在充、放电过程中，由于极化，工作电压偏离标准电动势 1.319V，充电工作电压范围在 1.4～1.5V 之间，放电范围在 1.2～1.3V 之间，电压平稳，曲线如图 8 所示。

温度和充、放电速率对低压氢-镍蓄电池的充电电压有明显的影响：温度高，充电电压低；充电速率快，充电电压高；放电倍率越大，放电容量和放电电压越低。低压氢-镍蓄电池的充、放电曲线如图 9 所示。

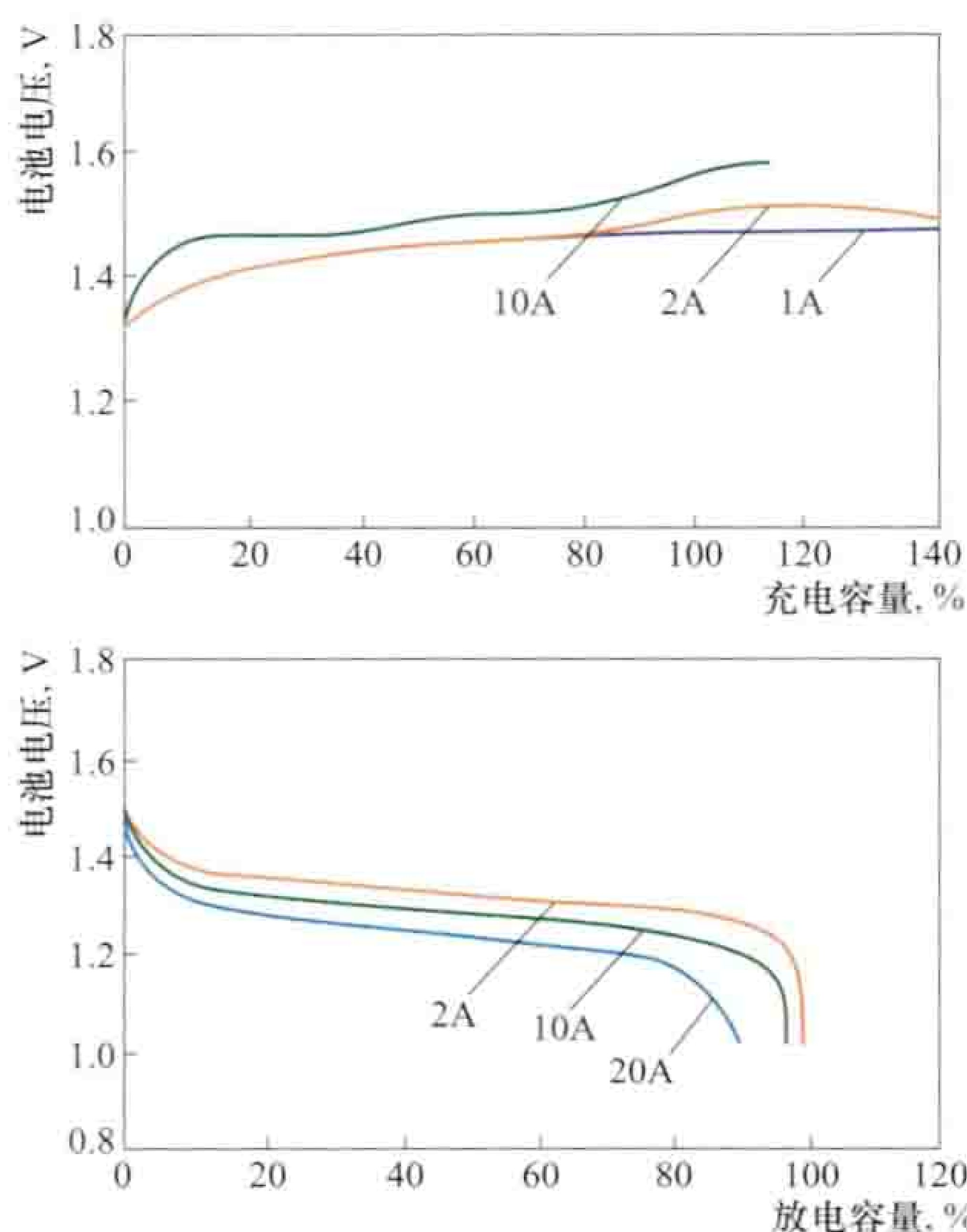


图 8 高压氢-镍蓄电池的充、放电曲线

氢-镍蓄电池过充电、过放电时，反应式见表 5。

氢-镍蓄电池在过放电时，正极析出氢气，负极进行氢气氧化生成水的过程，电池内部不会因为氢气积累造成压力升高，不会造成电解液浓度和水量变化，电池电压也基本保持不变，这表明氢-镍蓄电池具有耐过放电能力。随着充放电循环的进行，低压氢-镍蓄电池负极会逐渐失去催化能力，电池内压便升高。

高压氢-镍蓄电池在过充电时，正极发生水的电解析出氧气，负极析出氢气，因为负极本身为铂黑催化电极，因此正极析出的氧气与负极析出的氢气复合成水的反应速率非常快，电池内压不会升高，不会造成电解液浓度和水量变化，这表明高压氢-镍蓄电池具有耐过充电能力。

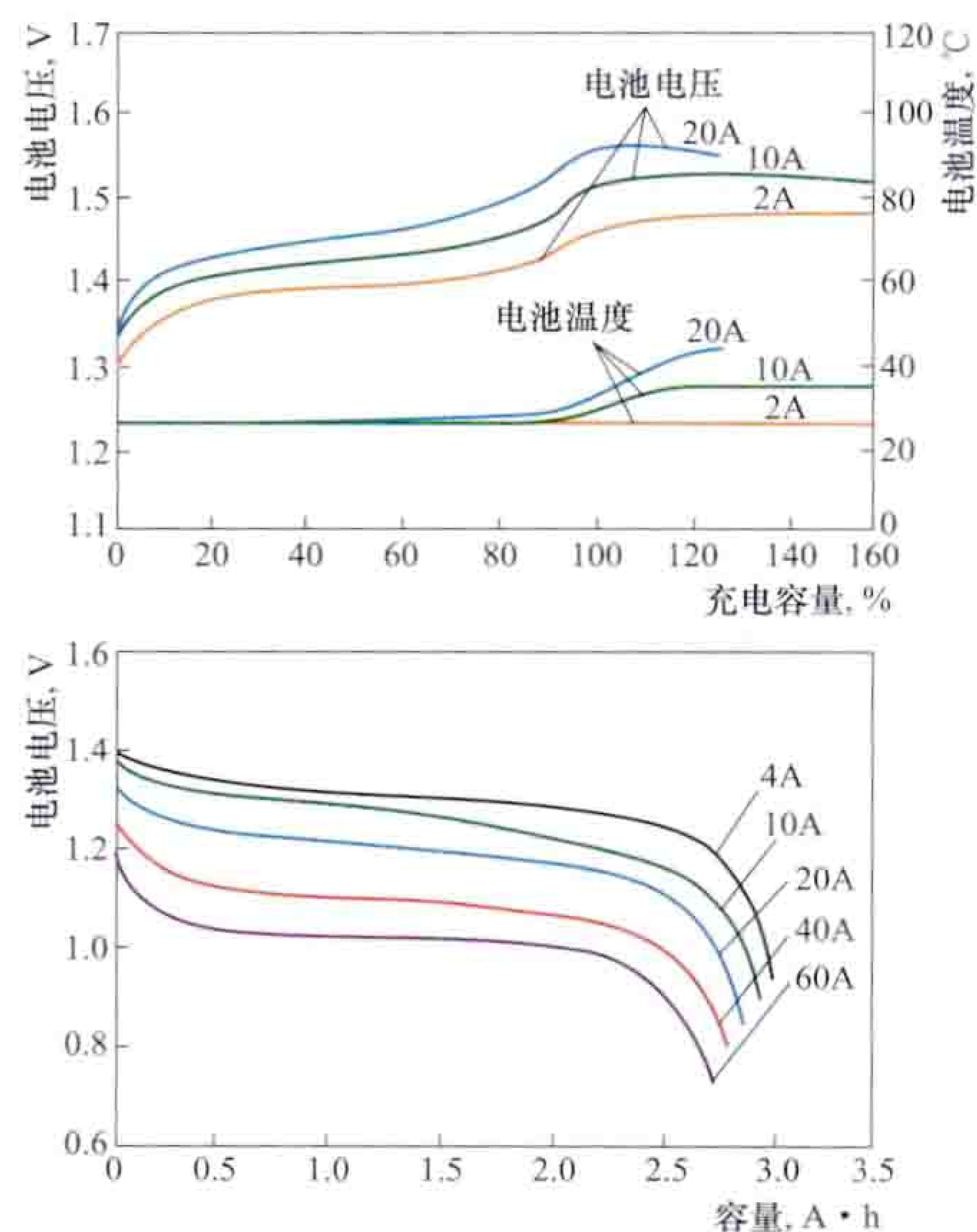


图 9 低压氢-镍蓄电池的充、放电曲线

低压氢-镍蓄电池在过充电时，正极析出氧气，氧气扩散到负极与金属氢化物发生反应。负极析出氢，氢原子在负极发生 $2H \longrightarrow H_2$ 和 $2H+2M \longrightarrow 2MH$ 反应，它们是一对竞争反应，前者主要发生在过充电且快充的条件下。在持续过充电情况下，由于负极逐渐氧化与粉化而导致吸氢性能的衰退，会引起电池内压的急剧升高，影响电池的循环寿命和安全性。

（2）电动势。高压氢-镍蓄电池的标准电动势为 1.319V，低压氢-镍蓄电池的标准电动势为 1.2V。

（3）容量。氢-镍蓄电池的容量与放电速率及工作温度有关，一般放电速率增加和工作温度升高都会使容量减小。高压氢-镍蓄电池的理论质量比能量达 378W·h/kg，实际达 45～70W·h/kg；理论体积比能量 273W·h/L，实际为 30～40W·h/L。低压氢-镍蓄电池的理论质量比能量达

表 5　氢-镍蓄电池过充电、过放电反应式

项　　目		正　　极	负　　极	总反应式
高压氢-镍蓄电池	过充电	$2OH^- \longrightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e$	$2H_2O + 2e \longrightarrow 2OH^- + H_2$	$H_2O \longrightarrow H_2O$
	过放电	$H_2O + e \longrightarrow OH^- + \frac{1}{2}H_2$	$\frac{1}{2}H_2 + OH^- \longrightarrow H_2O + e$	$H_2O \longrightarrow H_2O$
低压氢-镍蓄电池	过充电	$2OH^- \longrightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e$	$2MH + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow 2M + H_2O$ $2H_2O + 2e \longrightarrow 2OH^- + 2H$ $2H \longrightarrow H_2$ $2H + 2M \longrightarrow 2MH$	$2MH \longrightarrow 2MH$ $2MH \longrightarrow 2M + H_2$
	过放电	$H_2O + e \longrightarrow OH^- + \frac{1}{2}H_2$	$\frac{1}{2}H_2 + OH^- \longrightarrow H_2O + e$	$H_2O \longrightarrow H_2O$

275W・h/kg，实际为 35～45W・h/kg；理论体积比能量 1134W・h/L，实际为 90～120W・h/L。

（4）寿命。高压氢-镍蓄电池工作寿命长达 10 年以上，单体电池工作寿命结束的标志是放电工作电压下降到 1V 以下。低压氢-镍蓄电池的循环寿命为 1000～1400 次。

用途　高压氢-镍蓄电池具有比能量较高、寿命长、耐过充过放电以及可以通过氢压来指示电池荷电状态等优点，主要应用在空间技术。低压氢-镍蓄电池是一种环保绿色电池，除常用作电子产品、计算机产业、通信产业等小功率电池外，还用作要求高功率的无绳电动工具、电动玩具、电动助力车、电动自行车、电动汽车的动力电池。

jianxiebo

间谐波　（interharmonic）　电力系统中非整数倍基波频率的谐波，也称分数次谐波或分数谐波。间谐波含有率为周期性交流量中含有的第 ih 次间谐波分量的均方根值与基波分量的均方根值之比，用百分数表示。第 ih 次间谐波电压含有率用 $IHRU_{ih}$ 表示，第 ih 次间谐波电流含有率用 $IHRI_{ih}$ 表示，即

$$IHRU_{ih} = \frac{U_{ih}}{U_1} \times 100\%$$

$$IHRI_{ih} = \frac{I_{ih}}{I_1} \times 100\%$$

式中 U_{ih} 为第 ih 次间谐波电压均方根值；U_1 为基波电压均方根值；I_{ih} 为第 ih 次间谐波电流均方根值；I_1 为基波电流均方根值。

产生　间谐波在电力系统中广泛存在，一切非线性的设备和负荷都是谐波和间谐波源，包括：①铁磁饱和类铁芯设备，如变压器、电抗器等，其电磁饱和特性呈现非线性；②电子开关型设备，主要是交、直流各种换流装置及开关设备，其交流波形的开关切合和换向特性呈现非线性；③电弧型设备，以炼钢电弧炉和交流电焊机为主，其非线性特性表现为电弧电压与电弧电流之间不规则的、随机变化的伏安特性。

影响　间谐波不仅影响电能质量，而且会危及电力系统及设备的安全运行。主要有：①引起电压波动和闪变；②引起机电系统低频振荡；③引起无源滤波器过载；④干扰电力线上的控制、保护和通信信号；⑤影响电视机画面质量及增大收音机噪声；⑥影响以电压过零点为同步信号的控制设备以及某些家用电器的正常工作；⑦造成线损增加，一次运行设备寿命降低，继电保护装置误动，计量仪表误差等。

标准　中国是将间谐波作为电能质量指标单独制定标准的唯一国家，在参考 IEC 和 IEEE 相关标准规定的基础上，制定了 GB/T 24337—2009《电能质量　公用电网间谐波》。该标准规定了公用电网间谐波电压的允许值及测量取值方法。GB/T 24337—2009 规定的电力系统公共连接点（PCC）各次间谐波电压含有率限值见表 1；接于 PCC 的单一用户引起的各次间谐波电压含有率限值见表 2。

表 1　电力系统公共连接点（PCC）各次间谐波电压含有率限值（%）

电压等级	频率（Hz）	
	<100	100～800
1000V 及以下	0.2	0.5
1000V 以上	0.16	0.4

表 2　单一用户间谐波电压含有率限值（%）

电压等级	频率（Hz）	
	<100	100～800
1000V 及以下	0.16	0.4
1000V 以上	0.13	0.32

IEC 61000-2-2《电磁兼容　环境　公用低压供电系统中的低频传导干扰和信号传输的兼容性水平》，只对基波频率附近的间谐波电压导致供电电压幅值调制的情况给出兼容水平。IEC 61000-3-6《电磁兼容　限值　中压、高压和超高压供电系统中畸变负荷发射限值的评估》，规定系统间谐波的规划限值水平应取 0.2%～0.5%。IEEE 间谐波工作组文件（IEEE 519—1992、IEEE 519A—1996）对间谐波限值提出建议：低于 140Hz 的间谐波限值取 0.2%；140Hz 以上到某一频率之间（如 800Hz）的间谐波限值取 1%；对于更高频率的间谐波电压分量和总畸变为现有谐波限值的某一百分数（如 20%）。英国 G5/4《英国谐波电压畸变和非线性设备接入输电系统和配电网的规划值》中规定的间谐波电压限值见表 3。

表 3　英国间谐波电压限值

频率（Hz）	<80	80	90	>90 和<500
电压含有率（%）	0.2	0.2	0.5	0.5

改善措施　抑制间谐波的主要措施有：①限制间谐波的发射水平。大量间谐波用户应采取措施使其间谐波值符合标准规定。②抑制滤波器对间谐波的放大作用。滤波器需具有高阻尼系数，必要时可改用有源电力滤波器。③消除产生间谐波谐振的异常工况。选用励磁特性较好的电压互感器或改用电容式电压互感器；在电磁式电压互感器的开口三角绕组中加装适当的阻尼电阻；在母线上加装对地电容，破坏谐振条件；采取临时倒闸措施，投入时限规定好的某些线路或设备，破坏谐振产生的条件等。④提高负载的抗间谐波能力，降低其敏感度。

jiangdi xiansun jishu

降低线损技术 (technology for reducing line losses)

减少电力网电能损耗的措施与方法。电能在输送、变压、配电、用电等环节中的损耗，主要表现为各设备元件（导线、变压器、开关、互感器等）和线路所产生的电能损失，以及计量误差、抄表影响、窃电等管理因素造成的电能流失等。这部分电能损耗称为线路损失，简称线损。线损的程度以线损率表示。线损率是电网的一个综合性技术经济指标，它表示线路上所损失的电能占线路首端输出电能的百分比。线损率很少以一条线路进行考核，多是以一个电力系统或一个供电区域来计算它的综合线损率。线损率不仅可以综合反映一个单位或一个区域的供电经济性，也可以间接反映供电的技术条件和管理水平。线损率可按下式计算

$$线损率（\%）=\frac{供电量-售电量}{售电量}\times 100\%$$

式中供电量为供电端电能计量装置记录的电量；售电量为受电端电能计量装置记录的电量。

损耗分类 按损耗的特点，电能损耗可分为固定损耗、变动损耗和其他损耗；按损耗的性质，电能损耗又分为技术损耗和管理损耗。

固定损耗 也称空载损耗（铁损）或基本损耗。固定损耗与负荷大小无关，不随负荷变动而变化，只要设备带有电压，就消耗电能，就有损失，与通过设备的功率或电流大小无关。固定损耗主要包括变压器、调相机、调压器、电抗器、消弧线圈等设备的铁损及绝缘子的损失，电晕损失，电容器和电缆的介质损失，电能表电压线圈的损失等。

变动损耗 也称可变损耗或短路损耗（铜损）。变动损耗与负荷大小有关，随着负荷的变动而变化，与电流的二次方成正比。变动损耗主要包括变压器、调相机、调压器、电抗器、消弧线圈等设备的铜损，输、配电线路和接户线的铜损，电能表电流线圈的铜损等。

其他损耗 理论计算损失电量与实际损失电量的差值，是在电能的输电、变电、配电、用电过程中的一些不明因素和供用电过程中的窃电、漏计、丢失等造成的损失，习惯称为不明损耗或管理损耗。

技术损耗 技术损耗是电网各个元件电能损耗的总称，又称理论线损。它可以通过理论计算来预测。按损耗变化规律和负载运行特点，技术损耗又分为固定损耗和变动损耗。

管理损耗 在供用电过程中因管理不善产生的电量损失，包括电能计量装置误差、营业管理工作粗放、用户窃电等。这类损耗无一定规律，也不易测算，也称营业损耗。

降损措施 根据线损产生的原因，包括技术措施和管理措施。

技术措施 降低线损的技术措施主要是对电网某些部分或部件进行技术改造，实现经济运行、多供少损，包括选用合理的电网结构，电网经济运行，实施电网改造，提高用电功率因数，提高计量准确性等。

（1）选用合理的电网结构。合理的电网结构是满足用电需求，保证电能质量，降低线路损耗的一项根本措施。①科学设计，合理布局，在规划、建设与改造电网时，充分考虑有功和无功电源的配置、网架的发展、配电方式改变等，既能满足用电需求增长的需要，又能降低线损。②缩短供电半径，避免近电远供和迂回供电。③科学选择导线截面，减少电能损耗和线路压降。

（2）电网经济运行。在现有电网结构和布局下，不投资或少投资实现降低线损的方法。①变压器经济运行（见变压器节电技术）。②调整用电设备的运行方式，合理分配负荷，保持均衡用电，保证线路及设备在运行时间内所输送的负荷尽量合理。③合理调整电网运行电压水平，既可提高电能质量，又可降低线损。变动损耗与运行电压的二次方成反比，固定损耗与运行电压的二次方成正比。当固定损耗比变动损耗大时，降低运行电压使电网损耗减小；当固定损耗比变动损耗小时，提高运行电压使电网损耗减小。④使用节能型变压器，淘汰S7及以下型号的配电变压器。⑤合理配置配电变压器容量。根据日负荷曲线选择配电变压器最佳容量，提高配电变压器负载率。

（3）实施电网改造。改造不合理的网络结构，提高供电可靠性，降低电网损耗。①分流负荷，降低线路的电流密度。对负荷大、损耗高的线路进行分流改造，通过增加线路出线的方式降低线路负荷，从而降低线损。②对电网进行升压改造，简化电压等级和变电层次，减少重复的变电容量，简化电力网的接线，适应负荷增长的需要，降低网损。③调整负荷中心，优化电源分布，缩短供电半径，改造不合理的线路布局，消除近电远供、迂回倒送现象。④推广应用新技术、新工艺、新设备和新材料，采用新型节能型变压器、新型合金导线等。

图为20世纪90年代末的北京市城网改造现场。1998年7月，中国国务院决定，3年投入3700亿元用于城市电网和农村电网的建设与改造。



北京市城网改造现场（唐松寒 摄）

（4）提高用电功率因数。电网中电能损耗与用电功率因数的关系为

$$\Delta\delta=\frac{P^2}{U^2\cos^2\varphi}\times R$$

式中 $\Delta\delta$ 为电力网电能损耗；P 为用电的有功功率；U 为供电线电压；$\cos\varphi$ 为用电功率因数；R 为电力网的电阻。

当电力网输送的有功功率及供电电压一定时，线损与用电功率因数的二次方成反比。采用无功功率补偿设备提高功率因数，在负荷的有功功率保持不变的条件下，可以有效地降低电网电能损耗。提高功率因数主要有提高自然功率因数和人工补偿两种方法。

（5）提高计量准确性。①选用宽量程、高精度的电能表，

减少计量损失。②合理设置计量点，对专线用户加装失压记录仪。③推广应用远程自动抄表技术，实时监控用电工况。

管理措施　降低线损的管理措施主要有：①完善管理制度，以线损“四分”管理技术，实行分供电区、分电压等级、分线路、分变压器台区的管理机制。②提高变压器的综合负载率，既不能“小马拉大车”，更不能“大马拉小车”，避免电能的无效损耗。③加强营业管理，杜绝并及时纠正抄核收工作中的“跑冒滴漏”现象。④加强电能计量管理，开展营业普查，查处违章用电和窃电现象。

见配电网电能损耗管理。

jiaolian juyixi dianlan

交联聚乙烯电缆　(cross-linked polyethylene insulated cable)　用物理或化学方法将聚乙烯材料分子链从线型结构转变为体型结构（三维网状结构）后作为绝缘的一种挤包绝缘电缆（见配电电力电缆），简称 XLPE 电缆。交联聚乙烯电缆可用在各种电压等级的电力电缆线路中。

特点　交联聚乙烯电缆（见图 1）几乎完全保持聚乙烯电缆原有的电气性能，即击穿强度高、绝缘电阻系数大、介电常数小、介质损耗因数低等，并且由于交链状分子结构，使其具有较高的耐热性和耐老化性能。交联聚乙烯电缆的长期允许工作温度可达 90℃，允许过载温度为 105～130℃，允许短路温度为 250℃。图 2 所示为交流电缆断面。

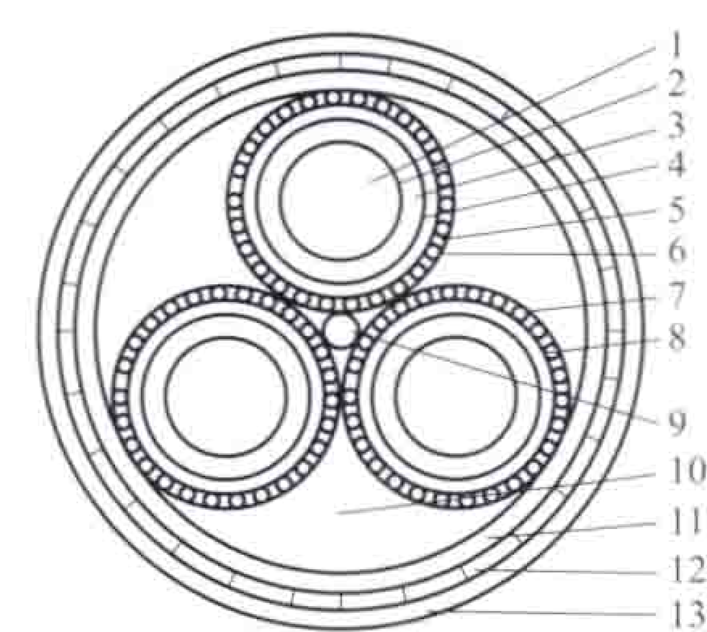


图 1　交联聚乙烯电缆结构示意图

1—线芯；2—线芯屏蔽；3—交联聚乙烯绝缘；4—绝缘屏蔽；5—保护带；6—铜丝屏蔽；7—螺旋铜带；8—塑料带；9—中心填芯；10—填料；11—内护套；12—铠装层；13—外护层

聚乙烯材料交联方法　包括物理交联、化学交联两大类。

物理交联　又称辐照交联，用高能粒子射线或电子束照射聚乙烯使其交联。物理交联多用于绝缘层较薄的电缆。

化学交联　在聚乙烯绝缘材料中加入少量的过氧化物（简称 DCP 交联剂）和抗老化剂在一定温度下进行交联。化学交联又分为蒸汽交联、干法交联和硅烷交联等不同的交联方法。



图 2　交流电缆断面图

蒸汽交联是在硫化管中用蒸汽作为加热和加压媒质的交联方法，也称湿式交联。交联过程中，过氧化物达到分解温度后，会产生挥发性气体，如甲烷、乙烷、水蒸气等。这些气体在绝缘中能形成直径为 0.001～0.01mm 的微孔，数量为 10^5 个/mm^3，含水量可达 2000～4000×10^{-6}。为了使微孔的尺寸保持在可接受的水平，需要提高蒸汽的压力（1～1.5MPa）。为了使过氧化物全部分解，交联过程还需要足够的时间。因此，硫化管要有一定的长度，一般为 70～100m（管径为 200～250mm）。交联度取决于加热温度和反应时间，当挤压线速度和温度保持不变时，交联度就取决于硫化管的长度，且越长越经济，如有的硫化管长度为 150～200m。这种交联工艺因含水量高，使绝缘的电气强度降低，在电场作用下容易产生水树枝，导致绝缘老化而击穿。因此它只适用于生产电压较低的交联聚乙烯电缆。

干法交联是用气体如氮气或六氟化硫气体代替蒸汽作为传热和传压媒质，或用气体作为压力媒质而用辐射方法加热电缆绝缘促使交联的方法。用干法交联可使绝缘中的微孔数减少到（1.5～2）×10^3 个/mm^3，含水量降低到（200～250）×10^{-9}。因此，绝缘的电气强度比蒸汽交联的提高了 20%以上，适用于生产较高电压等级的交联聚乙烯电缆。

硅烷交联是以少量过氧化物（0.1%DCP）用硅烷触媒剂混入聚乙烯绝缘材料中代替湿式或干法交联的加高温和加高压，使聚乙烯在水中交联的方法。硅烷交联方法有两种，即两步法及一步法：①两步法。第一步，把不饱和硅烷分子（乙烯基三甲氧基硅烷）利用有机过氧化物（DCP）作为引发剂接枝到热塑性聚乙烯分子链上，形成了活性硅烷基。上述反应在绝缘料厂进行，简称 A 料。绝缘料厂提供含催化剂的聚乙烯母料，简称 B 料。第二步，在电缆厂将 A、B 料按一定比例混合、挤包到电缆导体上，并在一定温度的水或蒸汽中进行交联反应，即活性硅烷乙烯基在催化剂及水存在的条件下水解缩合进行交联反应。上述反应是在一定温度的水或蒸汽中进行，故又称温水交联。该交联反应过程是吸水反应，所以绝缘中含水量极少，仅 200×10^{-6}左右，属于干法交联范畴，其绝缘品质与干法交联或辐照交联绝缘的一样。因此，硅烷交联不仅可生产1～35kV 交联电缆，还可生产 72～110kV 中高压交联电缆。②一步法。将材料接枝工艺和挤包电缆一次完成。该法的优点是生产工艺稳定，不存在材料贮存期问题，但是生产线投资较高。

常用交联生产线　包括物理交联生产线和化学交联生产线。物理交联生产线应用范围较窄，实际多采用化学交联生产线。化学交联生产线主要有悬链式连续硫化、垂直式连续硫化和水平式连续硫化三类。

悬链式连续硫化生产线　硫化管自上而下成悬链式布置，在管中完成交联过程，简称 CCV。这是早期交联电缆的生产线。因为绝缘层在交联反应前未能全部固化，又由于自重的原因绝缘容易产生偏心。因此一般只生产绝缘层外径小于 50mm 的交联聚乙烯电缆。

垂直式连续硫化生产线　硫化管自上而下成垂直线布置，在管中完成交联过程，简称 VCV。这种生产线避免了悬链式布置产生偏心或擦伤绝缘的缺点，适用于生产绝缘层外径较大（30～150mm）的交联聚乙烯电缆，其生产线速度可达 1～30m/min。因为交联过程需要有一定时间，硫化管必须达到一定的长度，支持硫化管就需要特殊设计的装备。

水平式连续硫化生产线　硫化管水平放置，用长承模在高温高压下进行交联，简称 HCV。按通过长承模所采用的润滑剂或辅助剂不同，水平式交联又有阿纳康达交联、长承模交联等。水平式交联可保证电缆芯直线移动而不经受弯

曲，这就满足了制造大截面导体交联电缆的要求。又因为加热交联与冷却区段是分开的，不会有水分渗入或扩散到绝缘内，因此绝缘近于干燥无微孔，并且电缆外径相当精确，同心度好。因为加热区和冷却区可以分开控制，交联温度可以控制在接近于聚乙烯热老化的临界温度，这样就可加快生产速度和缩小交联设备尺寸。

常见问题及解决办法 交联聚乙烯电缆在制造过程中遇到的主要质量问题有缺陷、树枝、热应力3类。

缺陷 在绝缘层中存在微孔、杂质和半导电凸起，是影响绝缘性能的重要因素。如将杂质大小由50μm降低到10μm，则绝缘的工频击穿强度可提高50%。因此，随着电压等级的增高，对缺陷的要求亦越为严格。日本、美国的交联聚乙烯电缆绝缘缺陷规定见表。

树枝 从显微镜中观察到的在交联聚乙烯电缆绝缘层中的气隙、杂质或水分以及屏蔽层和绝缘层之间表面不均匀等缺陷。在电场作用下产生局部放电，会导致绝缘老化而击穿。树枝的形成因其起因不同，又分为电树枝、化学树枝和水树枝。

日本、美国的交联聚乙烯电缆绝缘缺陷规定

额定电压(kV)	5～35	66	154	275	500
微孔(μm，≤)	75	50	50	30	20
烧焦树脂(μm，≤)	1250	250	250	250	80
金属或炭黑(μm，≤)	125	100	100	100	80
半导电层凸起(μm，≤)	125	250	250	250	50

(1) 电树枝。在绝缘层中由于过高的集中场强（如导线表面的毛刺或凸起，绝缘层中掺杂有金属粉末等）引起的局部放电，导致绝缘呈树枝状老化而击穿。如果采用内、外屏蔽层和绝缘层三层同时挤出的方法并使用超纯原材料且规定绝缘层厚度，在正常运行电压下，可以避免电树枝的产生。

(2) 化学树枝。没有金属密封护套的交联电缆，如果敷设在含有酸或碱的土壤中，日久后土壤中的化学溶液渗透至电缆绝缘内部，形成灌木状树枝导致绝缘老化而击穿。金属密封护套可以隔断化学溶液渗透途径，从而防止化学树枝的形成。

(3) 水树枝。以蒸汽或硅烷交联的电缆，其绝缘中存有凝结水，或因外界周围的水分自护层或导体的股线间侵入绝缘内，在电场和温度的作用下导致树枝状老化而击穿。

热应力 交联生产过程中温度降低时由于绝缘材料晶体两相热膨胀系数不同、弹性模量不同及不均匀的加热温度使绝缘材料收缩变形受到约束时产生的内应力。交联聚乙烯绝缘是一种半结晶半无定形片状交叉结构，由于热应力在结晶本身或无定形体界面上形成了裂缝，该裂缝就可以在直流电场下聚集空间电荷，如极性变化或反转时，可以在很低的电压下被击穿。采用热引力消除装置，改善交联工艺，降低挤出机的机筒温度及改进产品结构，可以减少绝缘热应力。

(1) 采用热应力消除装置。将冷却后的电缆再加热到结晶熔化温度，从而消除绝缘中的热应力，可提高电缆绝缘冲击强度。在20世纪80年代，电缆厂采用烘房退火消除热应力，也有明显的效果。

(2) 改善交联工艺。适当降低绝缘表面交联温度，提高预冷却管道长度。35kV及以下电缆绝缘表面不得超过275℃，66kV及以上电缆为250～275℃，采用计算机软件控制生产速度，使绝缘缓慢地冷却并向导体中心收缩，压紧导体，增加绝缘相对导体位移时的摩擦力。

(3) 降低挤出机的机筒温度。提高螺杆压力，使绝缘挤出后有较高的密实程度，既减少了热膨胀，又减小了微孔尺寸，使导体预热后可适当降低交联温度，改善绝缘内的温度分布，从而降低了热应力。

(4) 改进产品结构。适当增加内外半导电层厚度，将外半导电层做成可压缩的缓冲层，可以较迅速地吸收绝缘的径向热膨胀。



图3 交联聚乙烯电缆

发展 交联聚乙烯电缆（见图3）自20世纪50年代起发展较为迅速，尤其在日本、瑞典、美国等国家发展很快，它不仅在中、低压电压等级范围内已取代油浸纸绝缘电缆，而且在110kV以上电压等级也大量应用，如瑞典的245kV系统、日本的275kV系统、欧洲400kV系统。80年代日本生产出世界上第一根500kV交联聚乙烯电缆，投入抽水蓄能电站运行；90年代，日本进行了500kV交联聚乙烯电缆及附件的高电场热循环长期老化试验，证实500kV交联电缆及附件具有良好的长期运行可靠性；2000年11月21日，世界上首条500kV长距离电缆线路正式在日本东京电力公司投入运行，线路长度约39.8km。在中国，交联聚乙烯电缆的发展也非常迅速。在110～220kV电压等级范围内已取代了油浸纸绝缘电缆，在500kV电压等级交联聚乙烯电缆也得到了初步应用。

jiaoliu chuanji tiaosu

交流串级调速 (cascade speed control of AC motor)

在绕线转子感应电动机转子回路引入一个附加电动势实现调速的技术。当电源电压不变时，转子回路引入附加电动势后，转差率将发生相应的变化，从而实现调速。交流串级调速属于改变转差率的调速。（见交流电动机调速）

基本原理 在电源电压和负载转矩不变的情况下，绕线转子感应电动机的转子电流 I_2 近似为常数，即

$$I_2=\frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2+(sX_{20})^2}}\approx 常数$$

式中 E_{20} 为转子开路电动势；R_2 为转子回路电阻；X_{20} 为转子静止时转子绕组每相漏抗；s 为转差率。

如果在转子回路中引入一个三相对称附加电动势 E'，其频率等于转差频率，相位与转子感应电动势的相位一致或相反，则转子电流就取决于转子回路中电动势的代数和，即

$$I_2=\frac{sE_{20}\pm E'}{\sqrt{R_2^2+(sX_{20})^2}}\approx 常数$$

电动机在正常运行条件下 s 很小，故 $R_2\gg sX_{20}$，忽略 sX_{20}，则上式变为

$$sE_{20} \pm E' = 常数$$

E_{20}是取决于电源电压、频率和转子绕组有效匝数的常数，因此，改变附加电动势E'的大小即可改变转差率s，从而改变电动机转速。若附加电动势的相位与转子电动势相位一致，E'取正号，随着E'的增加，s将减小，转速上升，当s减小到等于零时，达到同步转速运行，如果进一步增加E'，s变为负值，电动机将超过同步转速运行。若附加电动势的相位与转子电动势相位相反，E'取负号，随着E'的增加，s也将增加，转速下降，当$E'=0$时转速最高，为固有机械特性上所确定的转速，显然，这种情况只能在低于同步转速下调节。

分类 根据产生附加电动势方法的不同，交流串级调速可分为超同步串级调速和低同步串级调速。

超同步串级调速 可以在同步转速以上或以下进行调速。由于转子电动势的频率随转差率的变化而变化，因此附加电动势的频率必须随转子转速的变化而变化，这就需要一个与转子转速完全协调的变频装置。实质上，这是一种向感应电动机定、转子同时馈电的双向馈电调速方法，又称双馈电机调速。实现超同步串级调速的方法有交流-直流-交流变流方式和交流-交流变流方式两种。

交流-直流-交流变流方式超同步串级调速的原理如图1所示，Ⅰ、Ⅱ为两组可控桥，T为变压器。改变Ⅱ组或Ⅰ组可控桥的逆变角，即可改变转子附加电动势的大小，达到调速的目的。当在低同步转速下作电动机运行时，Ⅰ组桥处于整流状态，将转差功率变换为直流电能，然后经Ⅱ组桥逆变成交流电，并经变压器反馈至电网。当在超同步转速下作电动机运行时，Ⅱ组桥处于整流状态，通过变压器从电网吸收交流电能，并整流成直流电能，然后经Ⅰ组桥逆变成与转子频率相同的电压，施加在转子电路里。

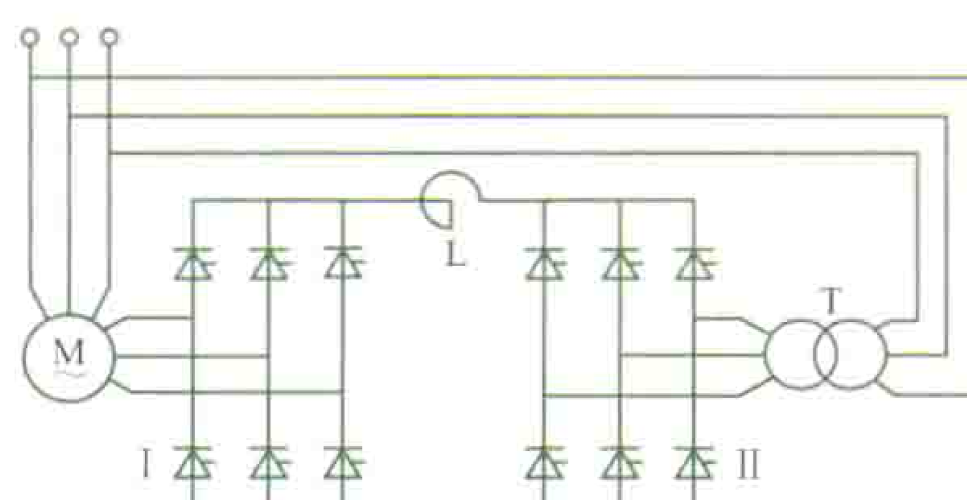


图1 交流-直流-交流变流方式超同步串级调速原理图

交流-交流变流方式超同步串级调速原理如图2所示，转子回路接入了交流-交流变频器（又称直接变频器或周波变流器）。该变频器由两组反并联的晶闸管变流器组成。这两组晶闸管变流器交替工作，提供转子附加低频电动势，其频率总与转子感应电动势频率相同，适当控制附加电动势的大小、相位和相序，便可以实现电动机转子与电源之间的频率转换和能量交换。

这种调速方法既可以电动方式运行，也可以制动方式运行，而且具有较高的功率因数，但线路复杂，投资较多，维护也较困难。

低同步串级调速 只能在同步转速以下进行调速，这是一种广泛应用的串级调速方法。将转子电动势通过整流装置变为直流电压，在直流回路中外加一个可调的附加电动势，避免了随时改变频率。由于不可控整流装置是单方向传递功率，只能将转子中的转差功率输出，而不能通过整流装置向转子绕组输入功率，因此低同步串级调速方法只能实现低于同步转速的调节。低同步串级调速根据转差功率回馈方式的不同，可分为机械串级调速和电气串级调速两种。

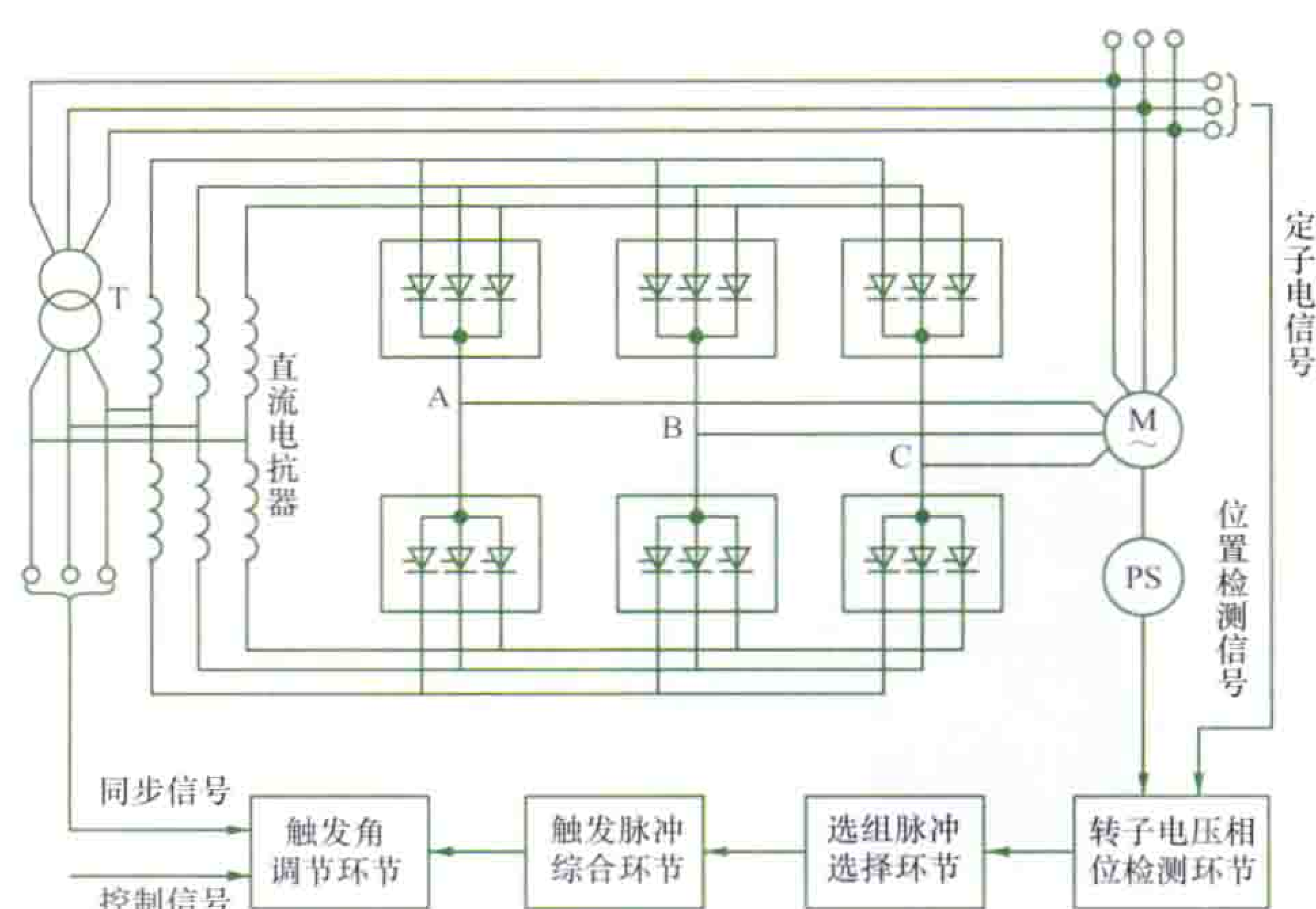


图2 交流-交流变流方式超同步串级调速原理图

感应电动机机械串级调速的原理如图3所示，感应电动机的转子电动势通过整流后加到直流电动机电枢两端，改变直流电动机的励磁，即可改变直流电动机的电枢电动势，也就改变了转子回路附加电动势的大小，从而改变转速。由于直流电动机与感应电动机同轴连接，所以两台电动机共同向负载输出机械功率，大大提高了运行效率。机械串级调速增加了一台直流电动机，使系统的机组庞大且噪声大，当转速较低时，直流电动机不能产生足够的附加直流电动势，因而调速范围不大，通常在2∶1以内。

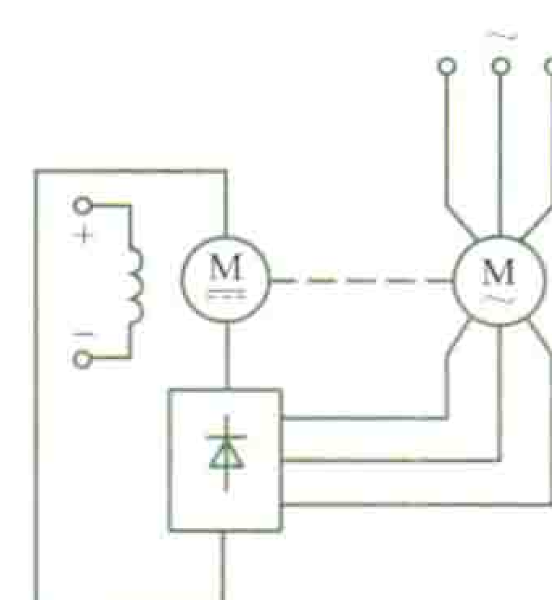


图3 感应电动机机械串级调速原理图

感应电动机电气串级调速原理图如图4所示，感应电动机转子的转差电动势经二极管整流后加至三相逆变器上，三相逆变器将直流电压逆变成三相交流电压，再经变压器将转差功率回馈到电网，改变逆变器中晶闸管的逆变角β，就可改变附加电动势E'的大小，从而调节转速。电气串级调速线路较简单，效率较高。其缺点是：由于电动机、变压器都要从电网吸收无功功率，同时电动机本身的利用系数下降，所以功率因数较低；逆变器产生的高次谐波电流对电网产生不利影响，在设计大容量电气串级调速系统时，必须考虑功率因数的补偿和高次谐波的抑制问题。

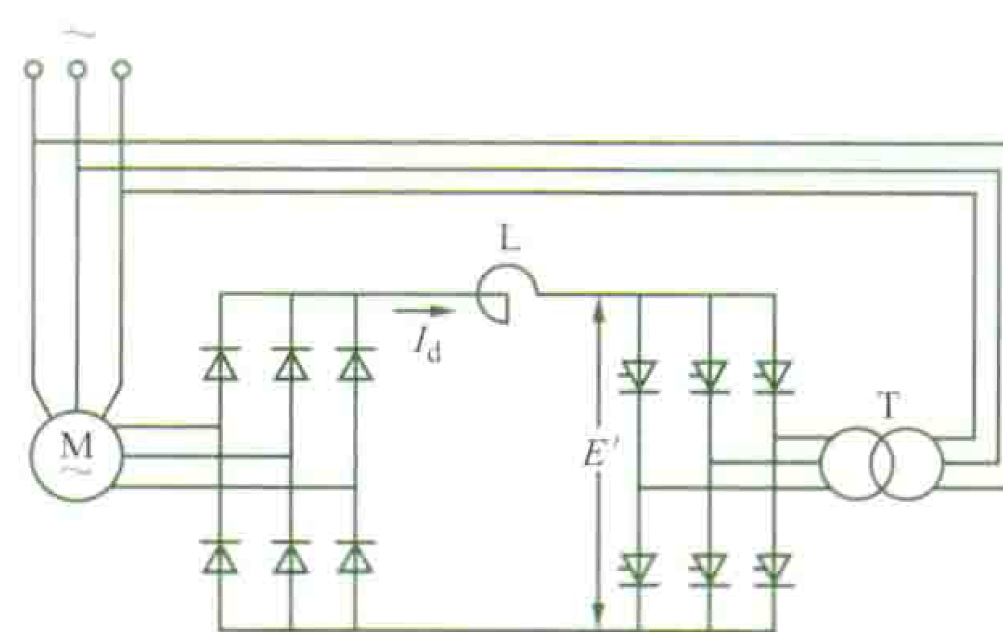


图4 感应电动机电气串级调速原理图

参考书目

陈伯时，陈敏逊．交流调速系统．2版．北京：机械工业出版社，2005.

jiaoliu diandongji

交流电动机 (alternating current motor) 依靠交流电源运行的电动机。交流电动机（见图）把交流电能转换为机械能，与直流电动机相比，它具有结构简单、价格便宜、

维护方便、惯性小、工作可靠等优点，单机功率、电压和转速都比直流电动机高得多。

交流电动机可分为同步电动机和感应电动机（异步电动机）两大类。同步电动机运行时的转速与所接电源频率之比为恒定值，这一转速就是同步转速。感应电动机运行时的转速低于同步转速，转子绕组有笼型和绕线式之分。交流电动机又有多相和单相之分。


交流电动机

交流电动机有定子（也叫电枢）和转子两大部分，它们之间有气隙。定子一般由0.5mm厚的硅钢片叠成，在叠片内圆冲有槽，槽内放电枢线圈，这些线圈按一定规律连成电枢绕组。同步电动机的转子为主磁极及励磁绕组，通过电刷和集电环，由外部直流电源向励磁绕组通入直流电流以产生磁场，这种结构称为旋转磁场式。一般同步电动机大都是这种结构。同步电动机也有将磁极装在定子上，而转子上嵌装三相交流电枢绕组，通过电刷和集电环与外电路接通，这种结构称为旋转电枢式。感应电动机的转子铁芯一般也由0.5mm厚的硅钢片叠压而成，可以是绕线式，也可以是笼型。其中笼型绕组是由嵌入（或铸入）转子槽内的铜条（或铝条）和两端的端环组成的一个闭合多相电路。

jiaoliu diandongji baohu

交流电动机保护

（protection of AC motor） 对交流电动机运行中出现的故障和危及安全运行的异常工况所采取的保护措施。交流电动机在起动、制动或正常运行中，其供电电源系统、交流电动机自身及其负载，出现故障或者危及安全的异常工况时，交流电动机保护将自动切断电源，或者给出信号由值班人员消除异常工况的根源，以减轻或避免交流电动机及其他设备的损坏和对由同一母线供电的用户的影响。交流电动机所出现的故障和异常工况不同，其保护措施也不相同。

故障和异常工况 交流电动机的故障，主要是定子绕组的多相及单相短路；其异常工况，主要是过电流。

多相和单相短路 交流电动机定子绕组或连接交流电动机与电源开关的电缆或母线上可能发生多相和单相短路。发生多相短路的基本特点是出现大的短路电流，短路点离电源越近，其短路电流也越大。过大的短路电流，可能导致定子绕组的损坏。因此，当发生多相短路时，需瞬时切断交流电动机的电源。交流电动机发生单相接地时，将产生接地电流，接地电流的大小视所接电网的接地方式不同而不同。对于供电变压器中性点直接接地的电网，交流电动机发生单相接地时，接地点将经过变压器中性点接地支路形成回路，较大的接地电流将流经故障回路，这时应利用保护装置切断交流电动机的电源。对于供电变压器中性点不接地的电网，当发生单相接地时，接地电流小，可不切断电源。当电动机转子长时间堵转时，电动机反电动势接近于零，定子将产生大于额定值几倍的电流，应切除电动机的电源。

过电流 造成过电流的主要原因有：所带的机械过负荷；供电电压下降致使转速降低；供电电压恢复时，感应电动机自起动；供电电网发生不对称，出现负序电流；同步电动机失步。较长时间的过电流会使电动机的温升超过最大的长期容许值（额定值），加速绕组绝缘的老化。

保护措施 交流电动机保护常用继电器来实现。继电器是当输入物理量（电量或非电量）达到规定值（整定值）时，其电气输出电路被接通（导通）或分断（阻断、关断）的一种电器。根据交流电动机的类型、容量和电压等级的不同，所采取的保护措施也不相同。中、小容量低压感应电动机，有的重要程度较低，可采用简单的保护；运行中发生漏电接地机会较多和容易发生断相、堵转等现象的交流电动机，需专门装设漏电保护、断相保护和堵转保护。大容量高压电动机的重要程度较高，应采用较完善的保护。同步电动机具有失步和励磁回路控制的特殊问题，需加设相应的保护。采用电力电子变换器驱动的交流电动机中，可以通过电力电子变换器的控制来切断交流电动机的电源，从而实现交流电动机的保护。

中、小容量低压感应电动机保护 包括短路保护、堵转保护、过负荷保护、断相保护、低电压保护、漏电保护和定子绕组温度检测保护。

（1）短路保护。当发生短路故障时，短路保护应瞬时切断电源。常采用熔断器、电流继电器或带电磁脱扣的低压断路器来实现的。如用熔断器作短路保护（见熔断器保护），必须附加断相保护。

（2）堵转保护。由于电气或机械原因造成电动机长时间堵转时，定子绕组将因过电流而产生过热。多采用电流继电器实现这种保护，但应避免电动机起动时（转子静止状态与堵转状态的物理情况相同）误动作，保护须经大于起动时间的延时后才切断电源。

（3）过负荷保护。电动机过负荷容许的时间取决于过负荷电流的大小，这种关系称为电动机的过负荷（热力）特性。过负荷保护的特性（动作时间与电流之间的关系）应尽量接近电动机的过负荷特性。最简单的过负荷保护是利用热继电器来实现的。热继电器结构简单、价格低廉，但对于重复短时工作的电动机，仅在其负荷特性是固定不变时，才能起保护作用。绕线转子感应电动机，因其过负荷特性不同，不宜采用热继电器作为过负荷保护。

（4）断相保护。三相感应电动机发生一相断线后，造成电动机断相运行。这时定子电流严重不平衡，将引起过热。根据三相电流不平衡这一特点，可安装带断相保护的热继电器作为过负荷保护，同时又可作为断相保护。

（5）低电压保护。当电动机负荷不变时，如电网电压降低，定子电流将显著增加而产生过电流。常利用供电回路交流接触器吸引线圈低电压释放及低压断路器的失压脱扣器作为低电压保护。

（6）漏电保护。为防止人身触电或电动机定子绕组接地，可装设漏电保护。漏电保护利用零序电流互感器来检测三相电流之和是否为零，当超过一定值时切断电动机的电源。（见剩余电流动作保护器）

（7）定子绕组温度检测保护。一种直接防止定子绕组温度过高的保护。能同时对由于过负荷、断相、三相电流不平衡、电源频率变化、环境温度过高或电动机通风不良、过电

压或低电压等引起的温度过高起到保护作用。常将正温度系数的热敏电阻元件埋入定子绕组，利用热敏电阻在动作温度附近阻值急剧变化的特性驱动出口电路，切断电动机的电源。

大容量高压感应电动机保护　包括相间短路保护、单相接地保护、过负荷保护和低电压保护。

（1）相间短路保护。2000kW 以上的高压感应电动机相间短路保护采用差动保护装置来实现。其工作原理是靠比较定子绕组的流进电流和流出电流之差而动作，因而定子绕组应有 6 个出线端，用以装设差动保护装置所需的电流互感器。根据不同的灵敏度要求，可选择三相式或两相式的保护接线。2000kW 以下的高压感应电动机常采用带速断-反时限的电流继电器构成瞬时电流速断保护作为相间短路保护。

（2）单相接地保护。采用零序电流互感器和与之连接的电流继电器构成。单相接地时，流经零序电流互感器的三相电流之和不为零，当接地电流达到一定值时，电流继电器动作，切断电动机的电源。

（3）过负荷保护。一般采用带反时限特性的过电流继电器。其时限特性应与电动机过负荷特性相近，并比电动机的稍低一些为好。这种保护采用的继电器没有累计过负荷的性能，不适用于重复短时运行的电动机。

（4）低电压保护。为了防止电压回路发生某些故障时低电压保护装置不正确动作，可将两个电压继电器接于电压互感器的不同相上，其触点串联后控制时间继电器，延时切除电动机。一套低电压保护装置，可同时保护同一母线供电的多台电动机。如果必须具有两个延时，可在接线中增加一个时间继电器。

大容量高压同步电动机保护　除了短路保护、单相接地保护、过负荷保护和低电压保护之外，还有失步保护、限制起动时间的保护、限制强励时间的保护、定子绕组过热保护。

（1）失步保护。包括失磁保护和励磁回路交流分量电流保护。在同步电动机励磁回路中，设置零励磁电流继电器构成失磁保护。当励磁电流小于一定数值时，继电器动作切断电动机的电源。励磁回路交流分量电流保护是在励磁回路内设置电流互感器，检测电动机失磁异步运行后在励磁回路中产生的交流分量电流，当出现交流分量电流时，继电器动作切断电动机的电源。

（2）限制起动时间的保护。主要用于降压起动的同步电动机，防止因未及时加全压和加励磁或负荷过重，延误牵入同步，使起动时间过长，造成起动绕组开焊。当起动时间超过规定值时，切断电动机的电源。

（3）限制强励时间的保护。同步电动机常采用加大励磁电流的措施，以增大其极限功率，防止因电网电压短时降低而失步，并为电网电压提供补偿，这种措施称强行励磁（简称强励）。强励应是短时间的，否则将造成励磁绕组过热，因而设置限制强励时间的保护。

（4）定子绕组过热保护。在定子绕组的有关部位埋入热电偶，直接测量绕组温度。这种方法可实现过负荷保护和因通风不良或环境温度过高等引起绕组过热的保护。

jiaoliu diandongji qidong

交流电动机起动　（startup of AC motor）

交流电动机从静止状态加速到工作转速的整个过程。它包括通电、最初起动和加速过程，必要时还包括与电源同步的过程。（见电动机起动）

起动方法　交流电动机起动包括感应电动机起动、同步电动机起动，软起动也是应用较多的一种交流电动机起动方式。

感应电动机起动　感应电动机如果在额定电压下直接起动，最初起动电流较大而起动转矩较小。由于感应电动机不存在换向问题，所以对不频繁起动的感应电动机来说，短时较大的最初起动电流对电动机本身没有影响。对于频繁起动的感应电动机（有的每小时合闸次数可高达数百次），由于频繁出现短时较大的最初起动电流，会使电动机内部严重发热而过热，因此，应当进行发热校验，或从发热考虑求得允许的每小时合闸次数。当供电变压器的容量相对电动机的容量不够大时，较大的最初起动电流会使供电变压器输出电压短时下降幅度较大，超过正常规定值。这不仅使正在起动的电动机的起动转矩下降很多，造成起动困难，甚至起动不了，同时也使由同一台变压器供电的其他负载不能正常工作。感应电动机的最初起动转矩虽然不大，但只要与起动时负载转矩相比足够大，就能直接起动。通常，如果感应电动机空载和轻载起动，直接起动时的最初起动转矩就足够大；如果是重载起动，且要求起动过程快时，直接起动时的最初起动转矩就不够大了。感应电动机不能直接起动的情况有两种：①供电变压器容量与电动机容量之比不够大；②最初起动转矩不够大。第一种情况下需要减小最初起动电流，第二种情况下需要加大最初起动转矩。减小最初起动电流的起动方法有降压起动、转子串电阻起动、频敏变阻器起动。

（1）降压起动。采用降低交流电动机定子绕组的电压进行起动的方法。降压起动时，利用某些降压设备或者改变定子绕组的连接方法降低电压。由于起动电流与起动时的电压成正比，所以能有效地减小起动电流。感应电动机的电磁转矩与电压的二次方成正比，因而起动转矩随电压的二次方减小，因此这种方法只适用于空载或轻载起动。当同步电动机异步起动时，也可采用降低定子绕组电压的方法进行起动。

（2）转子串电阻起动。先把绕线转子感应电动机或同步感应电动机的转子绕组与起动电阻串接起动，然后把电阻短路，使电动机正常运行的起动方法。运用转子串电阻起动，可以提高起动转矩和减小起动电流，甚至可以获得最大起动转矩，因此常用于起动困难的机械中。

（3）频敏变阻器起动。在绕线转子感应电动机转子回路串入频敏变阻器进行起动的方法。频敏变阻器起动是一种无触点变阻器起动，它能自动、无级地减小电阻，避免了转子串电阻逐级切除时的电流冲击和转矩冲击，而且大大简化了控制系统。频敏变阻器起动结构简单，运行可靠，使用和维护方便，因此应用日益广泛。但与转子串电阻起动相比，由于频敏变阻器具有一定的电抗，在同样起动电流下，起动转矩要小些。

转子串电阻起动、频敏变阻器起动方法同时也可加大最初起动转矩。

同步电动机起动　同步电动机在恒频起动过程中，本身没有起动转矩，所以不能自起动，必须采取其他措施。同步电动机起动方法有辅助动力机起动、异步起动、准同步起动和变频起动。

(1) 辅助动力机起动。用一台辅助动力机（容量为同步电动机的5%～15%，可以是直流电动机，或与同步电动机同极数的感应电动机，也可以是内燃机或其他的动力机），把同步电动机拖动到接近同步转速时，用自整步法将其投入电网，使电动机牵入同步。这种方法需要的设备较多，操作也较复杂，投入电网时，有电流冲击和转矩冲击，不适合带负载起动，所以用得不多。

(2) 异步起动。同步电动机大量采用的起动方法。为了解决恒频起动时的自起动问题，在同步电动机转子磁极极靴上装有类似笼型转子绕组那样的短路绕组，叫起动绕组。为了得到较大的起动转矩，起动绕组材料常用电阻率高的黄铜或铝青铜。起动时，将定子绕组接上电源，便能产生异步转矩使同步电动机转起来。但转子转速达不到同步转速，而是95%～97%的同步转速，称之为亚同步速。这时立即给它的励磁绕组通入励磁电流，建立主极磁场，依靠与定子旋转磁场之间的相互吸引将电动机牵入同步。如果条件不合适，还不一定能够牵入同步。一般来讲，在牵入同步前的转差率越小，同步电动机的转动惯量越小，负载越轻，牵入同步就越容易。

(3) 准同步起动。对同步电动机进行准同步操作来实现起动的方法。起动时用直流电动机拖动同步电动机作发电机运行，按同步发电机并网条件投入电网，并切断直流电动机电源，同步电动机由发电机运行转变为电动机运行。这种方法能显著减小起动电流对电网的影响。用这种方法起动的同步电动机，可以不要起动绕组，但要求有一台与同步电动机同轴连接的小容量直流电动机，而且一般只能空载起动。

(4) 变频起动。利用变频电源对同步电动机进行起动的方法。变频电源系将恒频恒压的交流电直接或经过中间环节变换为频率、电压均可调节的交流电的装置。起动时，电动机转子先加上励磁电流，然后连续升高变频电源的频率，使定子旋转磁场转速逐渐升高，依靠同步电磁转矩将电动机起动起来，转子转速随着定子旋转磁场同步地上升，直到额定转速，然后再把同步电动机投入电网，起动完毕。这种起动方法能实现大功率同步电动机平滑起动，且没有电流冲击，可起动容量为数万千瓦的同步电动机或大型发电、电动两用的蓄能机组。采用此法必须有变频电源，而且励磁机必须是非同轴的，否则在起动开始，转速很低时，无法建立所需的励磁电压。

交流电动机软起动 利用软起动器进行起动的方法。软起动器（或称固态软起动器，见*起动器*）可使电动机起动平稳，对电网冲击小。与传统起动设备相比，软起动器具有更好的起动控制性能。

图1所示是以晶闸管组成的软起动器主电路。图中三个反并联普通晶闸管模块VT1-VT4、VT3-VT6、VT2-VT5串接在电动机的三相电路中；M为交流电动机。

在起动过程中通过控制电路控制晶闸管导通角α的大小，使起动电流根据工作要求所设定的规律进行变化。这样，起动电流大小、起动方式均可任意调整与选择，使电动机处于最佳起动过程，同时还可以减少起动功率损耗。

软起动器还可自动检测电动机的负载变化，根据负载轻重而改变晶闸管的导通角，使电动机的工作电压在空载、轻载时自动降低，并随负载的变化而变化。在空载、轻载时降低工作电压，使每极磁通量减小，励磁电流减小，铁耗减小，从而减小了输入功率，减小了无功功率，提高了效率和功率因数。这样，软起动器能使电动机始终运行在较合理的工作电压下，达到了电动机空载、轻载节能运行的目的。

图1 晶闸管软起动器主电路

此外，软起动器还可实现电动机软停车、软制动（见*交流电动机制动*），以及过载、缺相、过压、欠压和三相不平衡等故障的检测与保护，大大提高了工作的可靠性。

交流电动机软起动主要有斜坡电压软起动、恒流软起动、斜坡恒流软起动、脉冲恒流软起动等方式。还有电压与电流控制的各种组合方式，如斜坡电压与电流限制下的软起动，起动脉冲、斜坡电压与电流限制下的软起动等。

(1) 斜坡电压软起动。早期的软起动器是以起动电压为控制对象进行软起动的。图2所示为斜坡电压控制示意图。图中，起动电压先以设定的速率增加，然后再转为额定电压U_N。斜坡电压软起动在某些工况应用时，还会出现较大的二次冲击电流，而且容易损坏晶闸管。

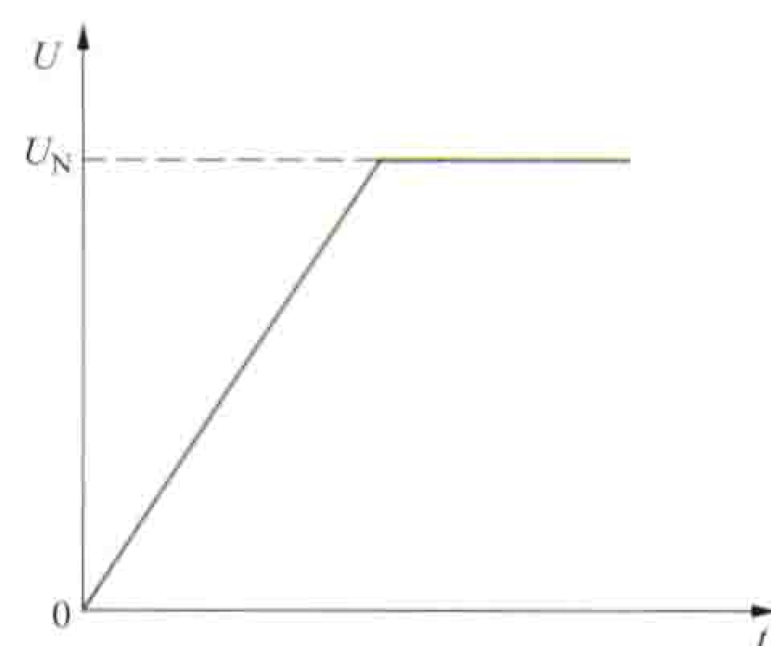


图2 斜坡电压控制示意图

(2) 恒流软起动。起动时起动电流保持恒定（即限定起动电流），其电流限定值I_{sm}通常在额定电流的1.5～4.5倍之间选择。软起动器大都以起动电流为控制对象进行软起动。图3表示了这种恒流软起动的电流特性。

设定的电流限定值I_{sm}大，则起动转矩大，起动时间短；I_{sm}小，则起动转矩小，起动时间长。恒流软起动一般适用于起动惯性大的场合。

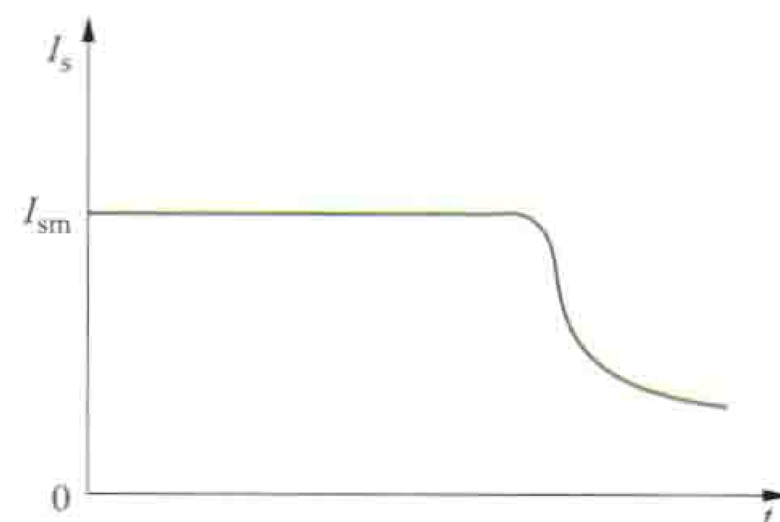


图3 恒流软起动的电流特性

(3) 斜坡恒流软起动。若控制起动电流以一定的速率平稳地增加，当起动电流增大到所设定的电流限定值I_{sm}时，就将起动电流保持恒定直至起动结束。图4表示了斜坡恒流软起动的电流特性。

从图4可以看出，电动机的起动过程分为两个阶段，先为斜坡起动阶段，后为恒流起动阶段。当起动即将结束时起动电流会自动减下来。起动电流上升变化率和恒流值都可以任意设定，恒流值I_{sm}的大小决定了起动时间的长短。因此，起动电流上升变化率和恒流值一般应根据负载情况与生产要求来设定，以使软起动器获得最佳的起动过程，并减少起动损耗。

斜坡恒流软起动一般适用于空载或轻载起动，也适用于

起动转矩随转速增加而增大的负载设备，如通风机、水泵等。

（4）脉冲恒流软起动。在起动初始阶段有一个较大的起动冲击电流，该电流值大于设定的恒流值 I_{sm}，从而能产生较大的起动冲击转矩去克服较大的静摩擦阻转矩，使电动机能够起动。然后进入恒流起动阶段，直至起动结束。脉冲恒流软起动的电流特性见图5。

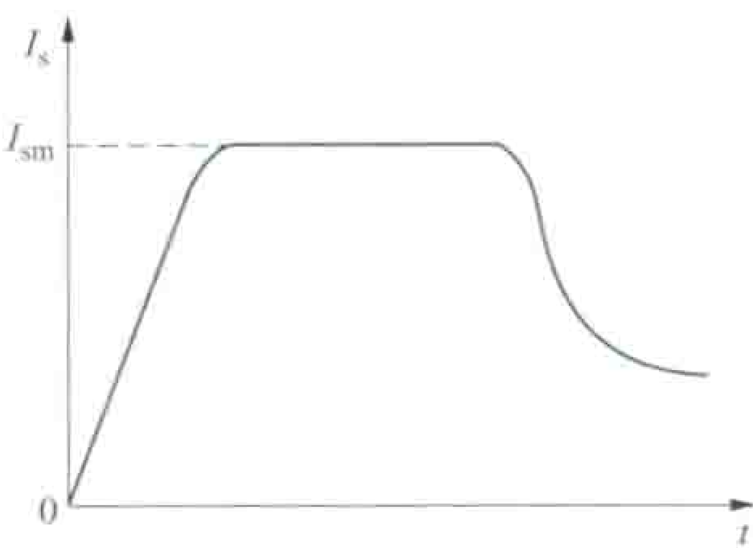


图4 斜坡恒流软起动的电流特性

图5中脉冲起动阶段电流的幅值和脉冲维持时间是可以设定的。显然，脉冲恒流软起动方式的起动转矩大，适用于重载起动，如皮带输送机、磨煤机的带载起动。

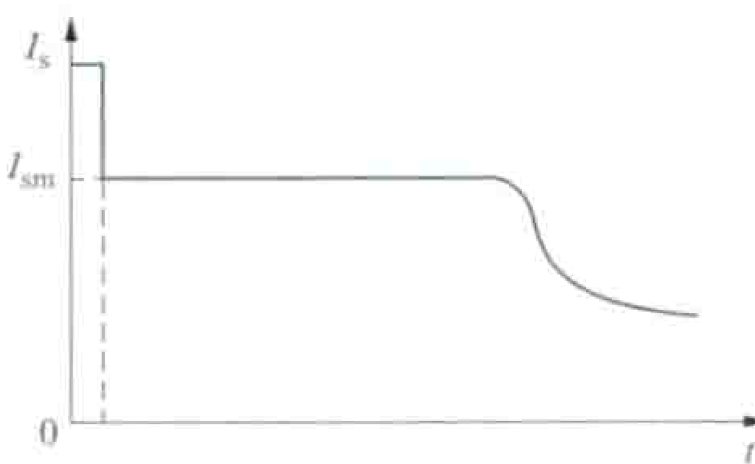


图5 脉冲恒流软起动的电流特性

主要性能特点及应用 交流电动机各种起动方法适用的电动机类型及主要性能和特点见表。

各种起动方法适用的电动机类型及主要性能和特点

起动方法	适用电动机	主要性能及特点
直接起动	笼型感应电动机 同步电动机	起动电流大，设备简单，操作方便。 适用于供电电源和电动机允许的条件下
降压起动	笼型感应电动机 同步电动机	起动电流随电压成正比下降，起动转矩随电压的二次方下降。 适用于空载或轻载起动
转子串电阻起动	绕线转子感应电动机 同步感应电动机	起动电流小，起动转矩大，控制较复杂。 适用于带负载起动
频敏变阻器起动	绕线转子感应电动机	为无触点变阻器起动。起动平稳，在相同起动电流下，比转子串电阻起动的起动转矩要小一些。 适用于带负载起动
准同步起动	同步电动机	起动电流小，无电流和转矩冲击，必须有直流电动机拖动。 适用于空载起动
变频起动	同步电动机	起动电流小，无电流和转矩冲击。必须有变频电源，励磁机必须非同轴连接
软起动	感应电动机 同步电动机	起动平稳，对电网冲击小，起动功率损耗小，有利于节能运行，可靠性高

jiaoliu diandongji shiliang kongzhi

交流电动机矢量控制 (vector control of AC motor)

借助于矢量控制实现交流电动机调速的技术。这种调速原理是德国西门子公司F. 布拉斯克（F. Blaschke）于1971年提出的。利用矢量控制能使交流电动机具有与直流电动机一样好的调速性能。因此，交流电动机矢量控制已成为理想的高性能交流变频调速方法。

基本原理 调速的关键是控制转矩。直流电动机的电枢电流和励磁电流可看成是正交的或解耦的矢量，可分别调节电枢电流和励磁电流，从而进行转矩、转速的控制。感应电动机中没有独立可控的励磁电流，但其定子三相交流电流所产生的定子合成磁通势矢量，与转子电流所产生的磁通矢量是以同步速度旋转的。如果从同步速度旋转的坐标系来看，转子磁通矢量可以认为是由转子直流矢量所产生，定子磁通势矢量为定子直流矢量所产生。可进一步将定子直流矢量分解成两个分量，一个分量与转子直流或转子磁通同方向（称励磁电流分量），另一个分量与其垂直（称转矩电流分量），即两分量也互相垂直，成为正交或解耦的矢量，与直流电动机两独立电流的性质一样。如图1（a）所示，i_{M1}为励磁电流分量，i_{T1}为转矩电流分量，i_1为定子电流。这种以转子磁通$\boldsymbol{\Phi}_2$为定向方向的坐标，称为磁场定向坐标，定子电流相对磁场定向坐标为直流电流。如果分别调节两个电流分量，交流电动机的转矩和转速控制就与直流电动机相似了。为了先将三相交流量（测量值）变换成两个互相垂直的直流量进行反馈控制，再将所需的控制量反变换为三相系统量去控制电动机，就必须应用矢量变换的方法，这种控制称为矢量变换控制。这种矢量变换通常是将静止的三相系统（定子abc坐标系）首先变换为静止的两相坐标系（称αβ坐标系）中的量，再将静止两相坐标系中的量变换为同步速度旋转的互相垂直的坐标系（称MT坐标系）中进行反馈控制，然后再将控制量反变换为三相系统进行控制。其各坐标系之间的关系如图1（a）所示。

同步电动机的矢量变换控制原理与感应电动机相似，不同的是选择气隙合成磁通矢量$\boldsymbol{\Phi}_m$作为磁场定向坐标系M轴的方向。其磁场定向坐标与其他坐标的关系如图1（b）所示。

为了实现上述变换和分析，可采用三相/两相坐标变换器、矢量回转器（VD）、矢量分析器（VA）及直角坐标/极坐标（K/P）变换器等。

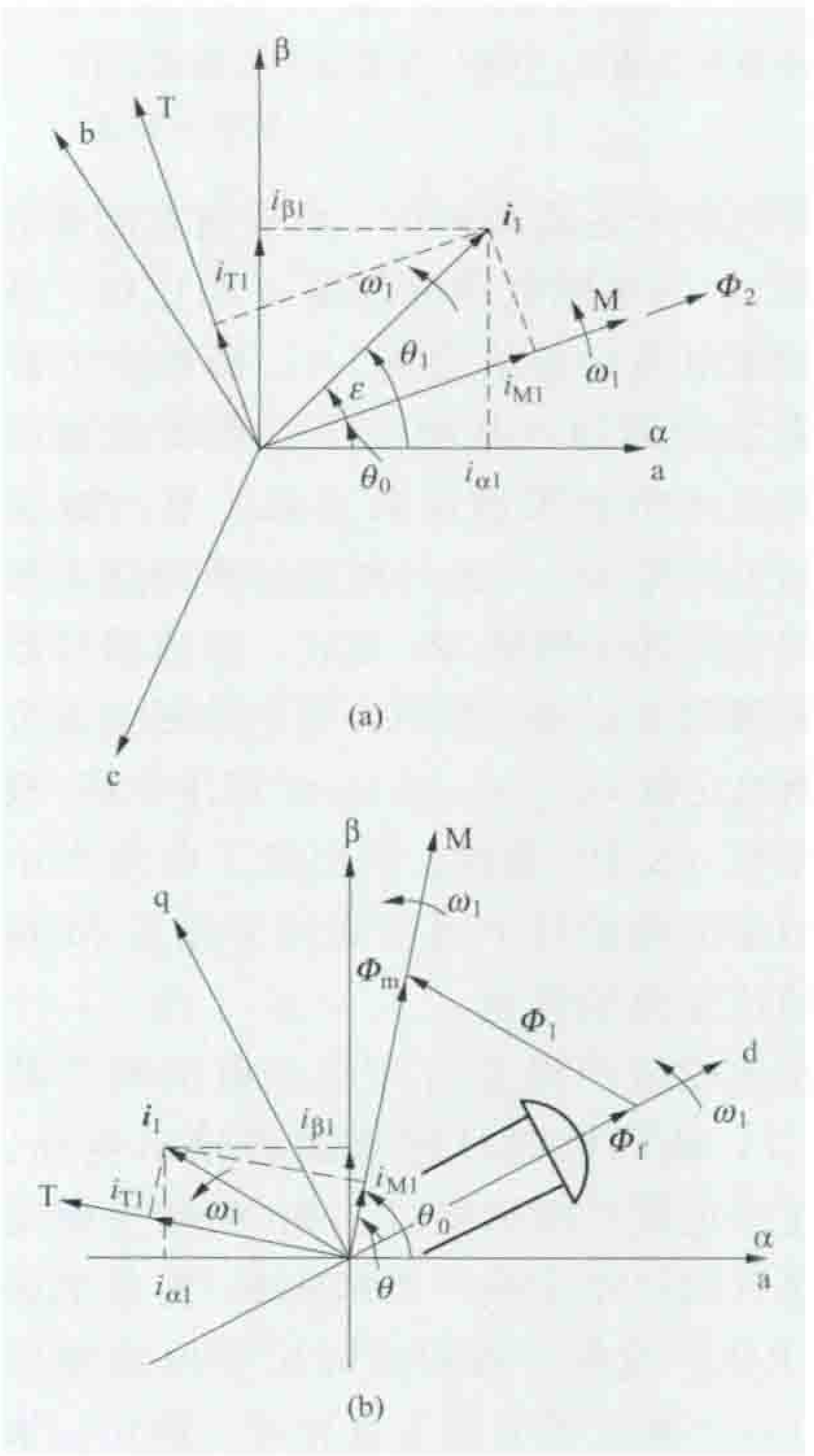


图1 电动机磁场定向坐标与其他坐标的关系

（a）感应电动机磁场定向坐标；

（b）同步电动机磁场定向坐标

控制系统 分

为感应电动机及同步电动机矢量控制系统。

感应电动机矢量控制系统　包括磁通检测式矢量控制系统及转差频率式矢量控制系统。

（1）磁通检测式感应电动机矢量控制系统。其逆变器可以是电压型逆变器，也可以是电流型逆变器。磁通检测可以是直接法，也可以是间接法。图 2 为磁通检测式感应电动机矢量控制系统框图。图中磁通检测系利用间接法，通过所测

图 2　磁通检测式感应电动机矢量控制系统框图

ΦT—磁通调节器；ST—速度调节器；K/P—直角坐标/极坐标变换器；LT—电流调节器；3Φ/2Φ—三相/两相坐标变换器；P/K—极坐标/直角坐标变换器；VR—矢量旋转变换器；JT—角度调节器；U/f—电压/频率变换器

得的定子电流和电压，由磁通观测器完成运算。速度给定信号 ω^* 与实际电动机速度 ω 相比较。速度调节器 ST 输出为转矩电流分量给定值 i^*_{T1}。函数发生器满足恒磁通（基频以下）和弱磁通运行方式所要求的函数关系，给出磁链给定信号 Ψ^*_2，并与磁通运算回路算得的实际转子磁链 Ψ'_2 比较，差值信号经磁通调节器 ΦT 作用，给出励磁电流分量给定值 i^*_{M1}。i^*_{T1} 与 i^*_{M1} 经直角坐标/极坐标（K/P）变换，给出定子电流大小给定值和相对于同步旋转坐标系 M 轴的位置角给定角 ε^*，$|i^*_1|$ 与 $|i_1|$ 相比较后的误差信号送至电流调节器 LT，从而控制可控整流桥输出电压。定子电流检测后经过三相/两相坐标变换（3Φ/2Φ 变换）及极坐标/直角坐标（P/K）变换，得到实际定子电流幅值 $|i_1|$ 及定子电流矢量相对于静止 α 轴线的空间位置角 θ_1，与 K/P 变换的输出 θ_0 角一起经过矢量旋转变换器 VR，可求得定子电流相对于转子磁通 M 轴的角度 ε，将所得 ε 角与给定值 ε^* 比较，通过另一个 VR 变换求得两者之差 Δε，再经过角度调节器 JT 和电压/频率变换器 U/f，变为频率信号控制逆变器的频率，从而实现电动机转速的控制。

根据同步转速旋转两相坐标系定向基准的不同，磁通检测式感应电动机矢量控制系统可分为转子磁场定向矢量控制、定子磁场定向矢量控制和气隙磁场定向矢量控制。转子磁场定向矢量控制系统结构简单，易于实现，调速性能良好，因而应用最为广泛。随着微机控制技术和电力电子技术的快速发展，采用数字信号处理器 DSP 为控制核心，基于交流-直流-交流电压型 PWM 变频器的全数字化感应电动机矢量控制技术已趋于成熟，得到越来越多的应用，其系统框图如图 3 所示。转子磁场定向矢量控制系统中同步转速旋转坐标系的 M 轴定在转子磁通方向上，因而坐标变换的基准角度 $\hat{\theta}$ 由转子磁通观测器利用检测到的定子电压、电流计算得到；转子磁通给定值 Φ^*_r 与转子磁通实际值 Φ_r 之间的误差信号经过磁链调节器（采用比例积分 PI 调节器）得到励磁电流分量给定值 i^*_M，而励磁电流分量给定值 i^*_M 与励磁电流分量实际值 i_M 之间的误差信号经过电流调节器（采用比例积分 PI 调节器）得到定子电压 M 轴分量 u^*_M；转速给定值 ω^*_r 与转速实际值 ω_r（由码盘检测得到）之间的误差信号经过转速调节器（采用比例积分 PI 调节器）得到转矩电流分量给定值 i^*_T，而转矩电流分量给定值 i^*_T 与转矩电流分量实际值 i_T 之间的误差信号经过电流调节器（采用比例积分 PI 调节器）得到定子电压 T 轴分量 u^*_T；定子电压 M/T 轴分量经过坐标变换送至 PWM 控制器，产生驱动开关器件动作的控制信号，使交流-直流-交流电压型 PWM 变频器输出感应电动机调速所需的定子电压，从而实现电动机转速的控制。

（2）转差频率式感应电动机矢量控制系统。图 4 为一种转差频率式电流源逆变器-感应电动机矢量控制系统的框图。转子磁通矢量的位置，是通过转差角频率 ω_s 和转子实际旋转角频率 ω 相加，再经过积分得到转子磁通矢量相对于静止 α 轴的空间位置角 θ_0。转子磁链给定值 Ψ^*_2 是根据转速给定值 ω^* 由保证恒转矩、恒功率运行方式的函数发生器给出。速度调节器 ST 输出转矩给定值 M^*，转矩电流分量给定值 i^*_{T1}、励磁电流分量给定值 i^*_{M1} 及转差频率 ω_s 均经过运算而得，i^*_{T1}、i^*_{M1} 经 K/P 变换后给出定子电流幅值给定值

图 3　采用交流-直流-交流电压型 PWM 变频器的转子磁场定向感应电动机矢量控制系统框图

$|i_1^*|$，同时给出矢量 $\boldsymbol{i}_1^*$ 相对于转子磁通矢量的位置角给定值 ε^*。$|i_1^*|$ 与实际定子电流幅值 $|i_1|$ 相比较，经电流调节器 LT 作用控制整流桥输出电压。定子电流经 3Φ/2Φ 变换和 VR 变换后，得到 i_{T1}、i_{M1} 实际值，再经过 K/P 变换后得到实际定子电流矢量相对于转子磁通矢量的空间位置角 ε，与 ε^* 比较后的差值 Δε 经过角度调节器 JT 对给定值进行修正，再加上转子磁通矢量的位置角 θ_0，即获得定子电流矢量的位置角 θ_1，以此控制触发脉冲，从而调节逆变器输出频率，改变电动机的转速。

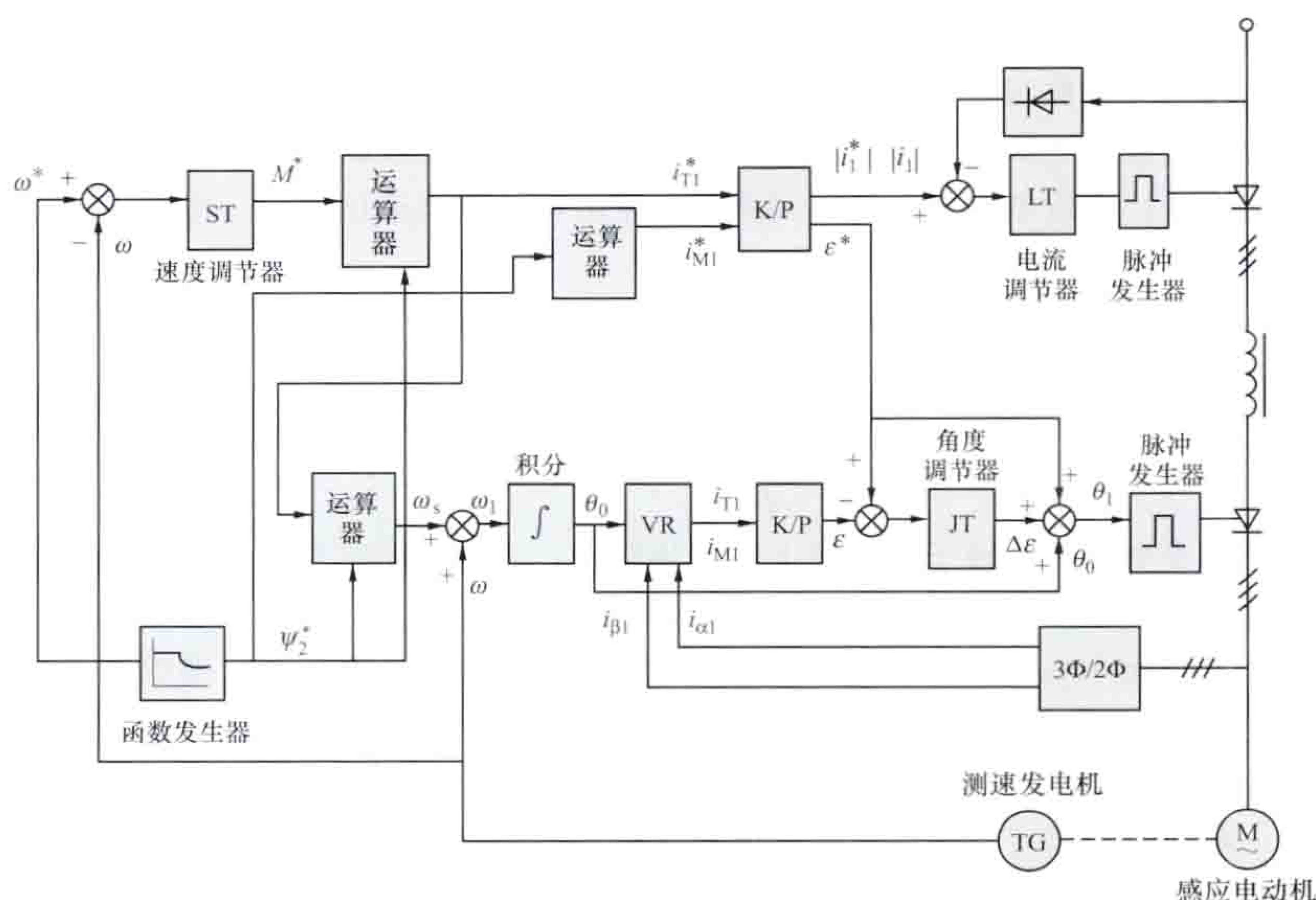


图 4　转差频率式电流源逆变器-感应电动机矢量控制系统框图

K/P—直角坐标/极坐标变换器；VR—矢量旋转变换器；3Φ/2Φ—三相/两相坐标变换器

同步电动机矢量控制系统　如图 5 所示，同步电动机定子绕组由交流-交流变频器供电，转子励磁绕组由可控整流器供电。气隙合成磁通方向的确定，系借助于转子位置检测器、磁极位置运算器、磁通运算器得到，可计算出气隙合成磁通 M 轴相对于静止 α 轴的位置角 θ_0 及相对于同步转速旋转坐标系 d 轴的位置角 θ。速度给定值 ω^* 与实测转子速度 ω 相比较，其误差信号送至速度调节器 ST，得出转矩给定值 T^*，经过除以有效磁通 $|\Phi_M|$ 的运算，得到转矩电流分量给定值 i_T^*。为保证恒转矩、恒功率运行的函数发生器给出有效磁通给定值 Φ_M^*，磁通调节器 ΦT 根据磁通给定值和实际值输出励磁电流分量给定值 i_M^*，电流给定值运算器进行反变换运算，算出静止 abc 系统中的电流给定值 i_a^*、i_b^*、i_c^* 及转子励磁电流给定值 i_f^*，各自与实际值比较后，经过相应的电流调节器 LT，控制变频器的输出电压和频率及励磁绕组的励磁电压，从而调节同步电动机的转速和相应地控制其励磁电流。

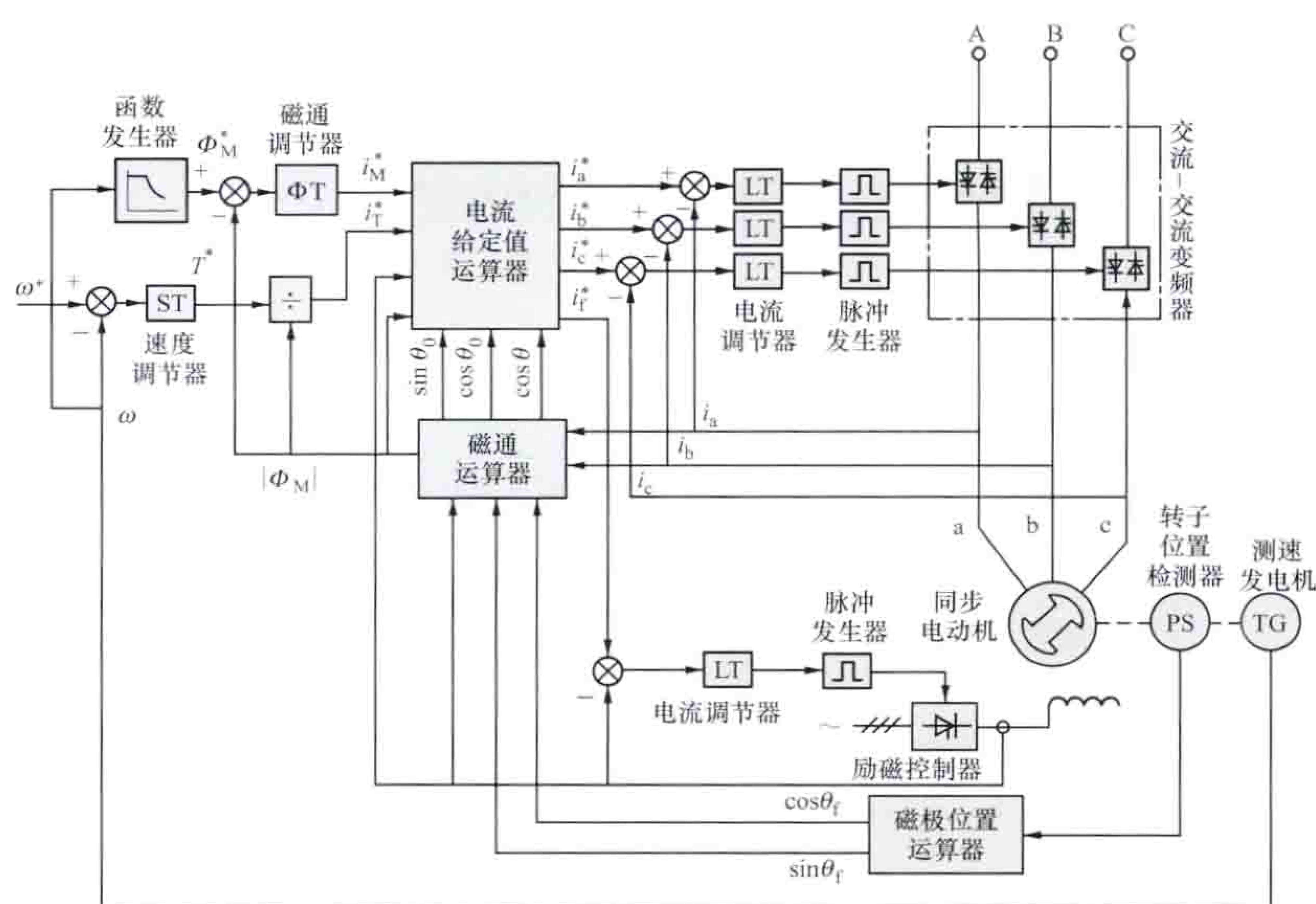


图 5　同步电动机矢量控制系统框图

特点及应用　采用矢量控制，可使感应电动机实现与直流电动机相同的、响应速度良好的调速控制，甚至超过了直流电动机的性能，而且同样可以实现弱磁调速，扩大调速范围。交流电动机的矢量控制已得到了广泛的应用，尤其是用于感应电动机的调速。如机床所用的伺服电动机，需要有微米级高精度定位控制，要求定位控制的角速度有 100rad/s 以上的响应速度，电动机容量一般为几千瓦；轧钢设备中的主轧机驱动系统，性能上要求能快速反转，大范围调速，以及大的过载能力和冲击负载等。以上这些场合都可应用矢量控制方法满足高性能的调速要求，其中有些采用直流电动机调速的场合，已逐渐由感应电动机的矢量控制调速所代替。同步电动机的矢量控制调速，如应用于压延机主压辊的电动机调速等，可获得比感应电动机更高的功率因数。进入 21 世纪以来，采用矢量控制技术的永磁同步电动机调速系统获得了愈来愈广泛的应用，特别是用于交流伺服控制。

参考书目

李永东．交流电机数字控制系统．北京：机械工业出版社，2003.

jiaoliu diandongji tiaosu

交流电动机调速　(speed control of AC motor)

通过改变交流电动机的供电频率、极对数和转差率等电气参量，来实现速度调节的技术，又称交流调速。在实际应用中，交流电动机总是与生产机械相联系，形成电力拖动系统。不同的生产机械要求不同的速度，即使同一个生产机械在不同的运行工况下，也需要不同的速度，因而需要对拖动系统的运行速度加以调节，即产生了交流电动机调速。

交流电动机，尤其是笼型感应电动机，由于没有机械换向装置，结构简单、运行可靠、维护方便、造价低廉，且有良好的节能效果，在单机容量和速度极限等方面都比直流电动机高。特别是在灰尘多、有爆炸危险的恶劣环境里，交流电动机更为适用。但由于在交流电动机的运行过程中励磁和转矩之间存在耦合，其调速控制比直流电动机困难。在很长

一段时间内，交流电动机不能用于调速性能要求较高的场合，而当矢量控制（见交流电动机矢量控制）、直接转矩控制（见交流电动机直接转矩控制）等高性能交流调速控制技术出现后，交流电动机已可以实现与直流电动机相媲美的调速性能。

基本原理和分类　交流电动机的同步转速 n_1 和电动机的供电电源频率 f_1、极对数 p 之间有着严格的关系

$$n_1=\frac{60f_1}{p}$$

同步电动机的转子转速即上述同步转速，可以采用改变供电电源频率 f_1 或极对数 p 的方法实现调节。

感应电动机的转子转速 n 与同步转速 n_1 存在有转差率 s 的差别，其转速为

$$n=n_1(1-s)$$

感应电动机可以采用改变供电电源频率、极对数、转差率的方法实现调速。

调速方法　交流电动机调速可分为调节频率调速、调节极对数调速和调节转差率调速三大类。

交流电动机调速度方法有变频调速，无换向器电动机调速，交流变极调速，交流调压调速，转子串电阻交流调速，交流串级调速，电磁转差离合器调速等，见表。

常用交流电动机调速方法比较

类别	调速方法	适用的电动机类别	主要性能及特点
调节频率	变频调速（独立控制式）	同步电动机、感应电动机（一般为笼型）	无级调速，恒转矩，效率较高，调速范围大
	无换向器电动机调速（自控式变频）	同步电动机（特殊结构）	无级调速，恒转矩，效率较高，调速范围较大
调节极对数	交流变极调速	可变极的感应电动机及同步电动机	有级调速，简单，恒转矩或恒功率
调节转差率	交流调压调速	感应电动机（一般为绕线转子型，小容量可用特殊笼型）	无级调速，恒转矩，效率低，调速范围不大
	转子串电阻交流调速	绕线转子感应电动机	有级调速，简单，特性软，效率低，轻载时调速范围很小
	电磁转差离合器调速	感应电动机和电磁转差离合器	无级调速，恒转矩，无制动转矩，效率低，轻载时难以调速
	交流串级调速	绕线转子感应电动机	无级调速，恒转矩，效率较高，次同步串级调速范围小，超同步串级调速范围可提高

技术特点　与直流电动机调速相比，交流电动机调速的构成形式要多得多。拖动用电动机有笼型感应电动机和绕线转子感应电动机，也有用同步电动机和无换向器电动机。交流电动机调速会遇到许多复杂情况，其中最主要的是：①交流电动机的转矩是定子和转子多个变量的函数，而不像直流电动机的转矩只取决于电枢电流与气隙磁通的乘积；②交流电动机的定子和转子磁通势有密切的相互作用，当速度变化时，这两个磁通势的相互作用又发生连续变化。因此，交流电动机调速要比直流电动机调速困难和复杂得多，它要用到更多的受控量。

交流电动机调速时，其静态和动态性能指标（见电动机调速）应满足生产机械的要求。还应考虑速度调节的经济性，即提高效率、节约能源和降低成本，不影响供电系统的电能质量，维护、操作方便等许多技术因素。现代交流调速采用了基于电力电子变流器的交流调速方案，具有高效率、宽调速范围、平滑调节特性及优良的静态和动态性能，但应注意高次谐波、换流、调速系统的构成等具体技术问题。

（1）高次谐波的影响。调速系统中变流器的输出或从电网吸收的电压、电流波形为矩形或梯形，含有高次谐波，特别是5、7次谐波的影响比较严重。它使电网损耗增加，并使电网电压波形发生畸变，电动机产生附加损耗、温升增加、出力受到限制、特性恶化。因而在选用电动机容量时应注意留有一定裕量。高次谐波还引起转矩脉动，特别是对低速稳定运行有较大的影响，有时容易产生谐振现象。为改善波形，可采用正弦电流变频器，应用脉宽调制（PWM）型变频器，电流型及电压型变频器中采用多重化技术等。

（2）换流问题。变流器中的晶闸管元件都需要换流，可以采用自然换流和强迫换流。自然换流是利用交流侧的交变电动势自然地使元件关断实现换流，无需设置任何附加的换流环节，但要求交流侧能提供必要的容性电流。强迫换流是在变流器内部采用专门的换流线路使元件强迫关断，换流环节不直接与电源或负载连接，不需要负载向变流器提供容性电流。交流调速系统中电网侧变流器可采用自然换流，其结果是使电网的功率因数恶化，大容量装置应注意采用补偿装置。电动机侧变流器当采用自然换流时，可配以无换向器电动机以提供容性电流，也可选用感应电动机，但需有昂贵的电容补偿。否则应采用强迫换流，这将使线路复杂化，晶闸管利用率降低。

（3）调速系统的构成。由可控电源、交流电动机及控制电路组成交流调速系统，它比直流调速系统要复杂得多。首先，交流电动机的电磁关系远较直流电动机复杂，特别是感应电动机，多个参量彼此制约，加之饱和及高次谐波的影响，使对调速系统的特性分析变得十分复杂。其次，调速系统中的元器件、装置及电动机相互之间，还存在着相互配合的问题。另外，调速系统的控制电路应当考虑瞬时停电措施，如果变频装置没有瞬时停电措施，可能产生过电压和过电流现象，在恢复供电时，可能造成逆变器换流失败。为此，对瞬时停电的交流调速系统，应具有检测、过电压吸收回路快速作用、变频装置继续正常运行等措施。

沿革与发展　早在20世纪30年代，有学者就提出了各种交流调速系统，来改善交流电动机的调速性能。40年代初出现了无换向器电动机的试验装置。40年代中期，以汞弧整流器作为变流元件的串级调速装置投入运行。50年代，用闸流管组成的三相逆变器供电的感应电动机调速系统在试验室中进行了试验。50年代后期，晶闸管问世。60年代初，在静止逆变器上应用了强迫换流技术，出现了有实用价值的、

高效率的变压、变频电源装置。直到60年代，才基本上解决了交流调速传动在工业应用中的关键技术问题。60年代末，德国的A. 舍龙（A. Schonung）等又将通信系统的调制技术应用于交流电动机调速中，采用了脉冲宽度调制实现变频调速，基本上克服了方波型变频器输出中谐波分量较大的缺点。70年代初，德国西门子公司的F. 布拉斯克（F. Blaschke）提出了一种新的控制方法和理论——矢量控制，也称为磁场定向控制，使交流电动机的调速性能有可能与直流电动机的调速性能相媲美。

随着交流电动机调速技术的不断发展，其应用范围愈发广泛。除要求调速的交流传动系统采用交流电动机调速外，原有大量恒速运行的交流传动系统如风机、水泵等设备，从节约能源的观点，也大量采用了交流电动机调速。原采用直流调速的轧钢、造纸、提升机械、数控机床、工业机器人中的伺服系统等，也已被交流调速所代替。20世纪90年代以来，由于半导体技术的飞速发展，功率MOS场效应管（P-MOSFET）、绝缘栅双极晶体管（IGBT）等开关器件得到了广泛应用，交流电动机调速所需的功率电路和控制电路也从分立元件向着大规模集成电路微型化、轻量化发展，从而使交流电动机调速装置的可靠性和经济性不断提高。21世纪以来，随着计算机技术和数字信号处理技术的快速发展，高性能的单片机（MCU）、数字信号处理器（DSP）已被用作交流电动机数字控制系统的核心元件，其强大的计算功能和丰富的外设资源为进一步提高交流电动机调速系统的性能提供了硬件保障。特别是基于DSP实现的高性能控制方法与先进功能层出不穷，如磁链观测器、参数辨识、无传感器控制、调节器自整定、转矩预测等。这些新技术的发展进一步提高了交流电动机调速的响应速度、控制精度以及抗干扰能力。

在绝大多数应用场合，交流电动机调速已取代直流电动机调速。

jiaoliu diandongji zhijie zhuanju kongzhi

交流电动机直接转矩控制 （direct torque control of AC motor） 借助于直接转矩控制实现交流电动机调速的技术。该调速原理于1985年由德国的M. 迪潘布鲁克（M. Depenbrock）首次提出。相对于矢量控制，直接转矩控制省掉了复杂的矢量变换，对转矩和磁链直接进行控制，可实现转矩的迅速响应，是一种高动、静态性能的交流调速方法。

基本原理 根据感应电动机在静止αβ坐标系下的模型，有

$$\left.\begin{aligned}\sigma \mathrm{d}T_e/\mathrm{d}t &\approx p(\boldsymbol{\psi}_s \otimes \boldsymbol{U}_s) - p\omega_r \boldsymbol{\psi}_s \cdot \boldsymbol{\psi}_s - R_m T_e \\ \mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_s/\mathrm{d}t &= (\boldsymbol{U}_s - R_s \boldsymbol{I}_s)\cdot \boldsymbol{\psi}_s / |\boldsymbol{\psi}_s|\end{aligned}\right\}$$

$$\sigma = (L_s L_r - L_m^2)/L_m$$

$$R_m = R_s L_r / L_m + R_r L_s / L_m$$

式中 T_e 为电磁转矩；p 为极对数；R_s 为定子电阻；R_r 为转子电阻；L_s 为定子电感；L_r 为转子电感；L_m 为定转子互感；$\boldsymbol{\psi}_s$ 为定子磁链矢量；$\boldsymbol{U}_s$ 为定子电压矢量；$\boldsymbol{I}_s$ 为定子电流矢量。

根据上式，只要输入电压矢量存在与定子磁链相平行的分量就可以调节定子磁链，只要输入电压矢量存在与定子磁链相垂直的分量就可以调节电磁转矩，且电磁转矩变化的大小与垂直分量和定子磁链的乘积相关。

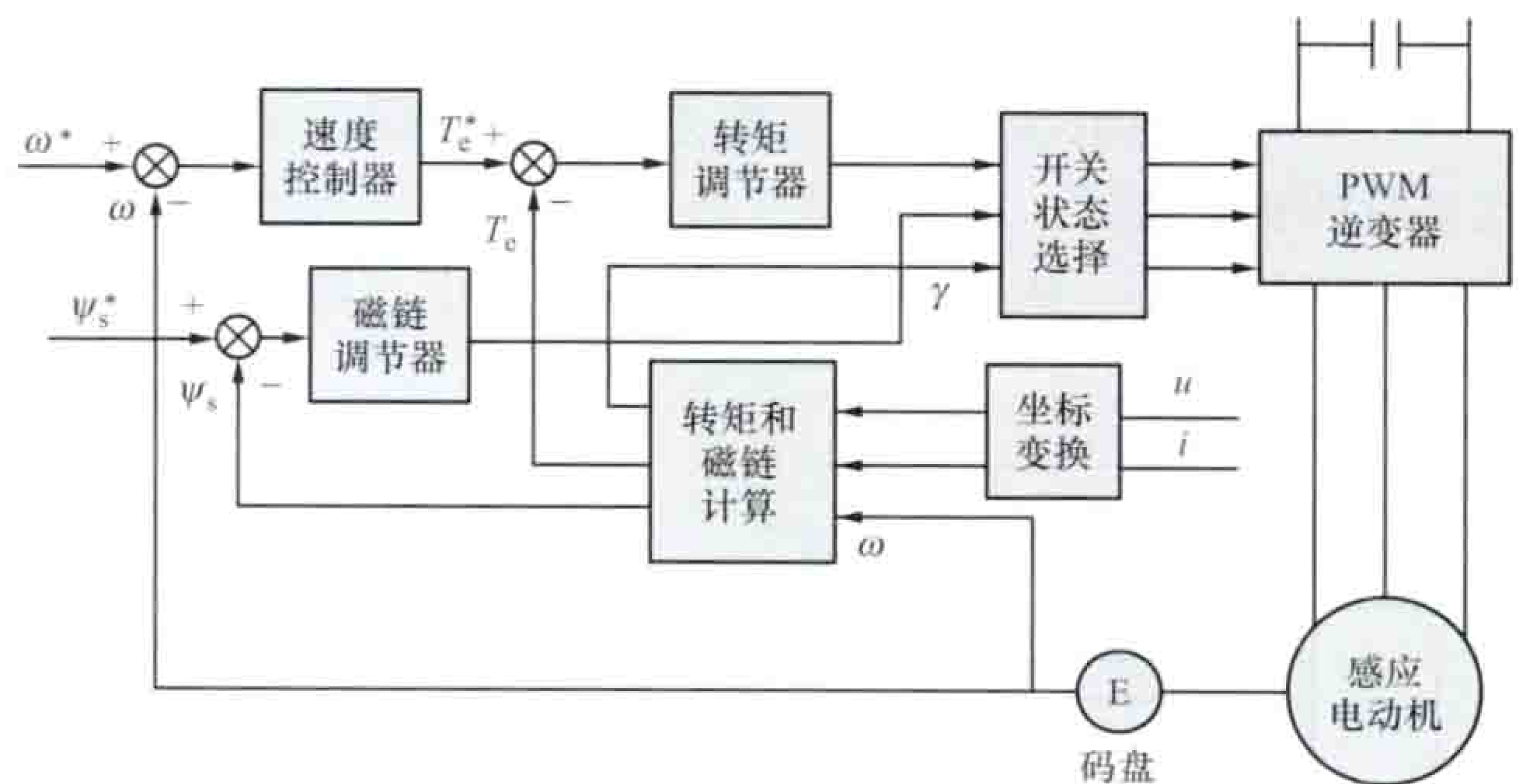
在直接转矩控制中，电动机定子磁链的幅值可通过电压矢量的控制而保持为额定值，电动机的电磁转矩调节可通过控制定、转子磁链之间的夹角来实现。电动机定、转子磁链之间的夹角也可以通过电压空间矢量的控制来调节。由于转子磁链的转动速度保持不变，因此该夹角的调节可以通过调节定子磁链的瞬时转动速度来实现。

假设电动机转子逆时针方向旋转，如果实际转矩小于给定值，则选择使定子磁链逆时针方向旋转的电压矢量，这样角度增加，实际转矩增加。一旦实际转矩高于给定值，选择使定子磁链反方向旋转的电压矢量，则角度减小。通过这种方式选择电压矢量，定子磁链一直旋转，且其旋转方向由转矩调节器决定。

直接转矩控制系统对转矩和磁链的控制通过滞环比较器来实现。滞环比较器的运行原理：当前值与给定值的误差在滞环比较器的允差范围内时，比较器的输出保持不变，一旦超过这个范围，滞环比较器便给出相应的值。

直接转矩控制的关键是定子磁链的获得，无论磁链控制还是电动机电磁转矩的计算，都需要建立在精确获得定子磁链的基础之上。由于磁链并不可以直接测量，需要合适的观测器对其进行估计。常用的定子观测器有 u-i 模型、i-n 模型和 u-n 模型观测器。

控制系统 感应电动机直接转矩控制的原理框图如图所示，根据电动机定子电压、电流和转速，利用基于感应电动机数学模型的定子观测器计算得到转矩实际值 T_e 和定子磁链估计值 Ψ_s，以及转子位移 γ。转速给定值 ω^* 与转速实际值 ω 相比较，经过速度控制器得到转矩给定值 T_e^*。转矩给定值 T_e^* 与转矩实际值 T_e 相比较，经过转矩调节器（采用滞环比较器）得到转矩控制信号。将定子磁链给定值 Ψ_s^* 与定子磁链估计值 Ψ_s 相比较，经过磁链调节器（采用滞环比较器）得到磁链控制信号。根据转矩控制信号、磁链控制信号和计算得到的转子位移 γ，结合查表得出电压空间矢量，生成脉宽调制（PWM）信号，输出给PWM逆变器（见交流脉宽调制变频调速），为电动机供电，实现感应电动机的直接转矩控制。



感应电动机直接转矩控制原理框图

应用与发展 交流电动机直接转矩控制是直接在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型，控制电动机的磁链和转矩。它不需要将交流电动机等效为直流电动机，省去了矢量变换中的许多复杂计算，它不需要模仿直流电

动机的控制，也不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型。因此，直接转矩控制计算量小，易于实现，适用于对转矩控制性能要求高的调速场合。直接转矩控制可应用于感应电动机调速，也可应用于永磁同步电动机调速。目前，该技术已成功地应用在牵引电力机车的大功率交流传动上。

现代控制理论和智能控制理论（以模糊控制和人工神经网络为主）是人们改进直接转矩控制系统最主要的理论依据。高性能的数字信号处理器（DSP）和种类众多的新型中央处理器（CPU）的出现，则为改进直接转矩控制系统提供了强大的物质基础。人们对直接转矩控制系统各种局部性能的改善已有了很多选择方案，因此，追求整体性能最优将成为今后直接转矩控制研究的主要方向。通过改进系统各组成环节的内部结构来提高系统性能，效果非常有限。从软件方面改进系统性能将是发展趋势。尤其是神经网络与模糊控制结合的智能控制，如模糊神经网络或神经网络模糊控制，必将成为直接转矩控制的重要手段。采用DSP或CPU实现的直接转矩控制系统全数字化也是直接转矩控制的重要发展方向。此外，将直流转矩控制从感应电动机调速的传统应用领域扩展至永磁同步电动机及无刷直流电动机等应用领域也必将使直接转矩控制在传动领域中的应用更加广泛。

jiaoliu diandongji zhidong

交流电动机制动 (braking of AC motor) 将交流电动机电磁转矩的方向改变为与转子转向相反，以实现电动机的停转或限速。制动的目的是使交流电动机转子尽快停转或由高速迅速变为低速或限制位能性负载的下降速度。交流电动机的制动可分为能耗制动、反接制动、回馈制动和软制动。

能耗制动 可分为感应电动机能耗制动和同步电动机能耗制动。

（1）感应电动机能耗制动。将正在电动运行的感应电动机定子绕组从交流电网断开，接到直流电源上，由直流电流励磁，在气隙中建立恒定磁场，由惯性作用拖动的转子绕组切割这一磁场产生感应电动势和电流，该电流与磁场作用产生的转矩起制动作用。这时转子的动能全部变换成电能消耗在转子回路的电阻上，故称能耗制动。能耗制动多用来使感应电动机迅速停转，其典型线路和机械特性如图1所示。图1（b）中P点为电动机的原工作点，第二象限的曲线为加入直流后的机械特性。改变图1（a）中变压器二次电压可调节励磁电流的大小，从而控制制动转矩的大小。如为绕线转子感应电动机，改变转子附加电阻，也可调节制动转矩的大小。

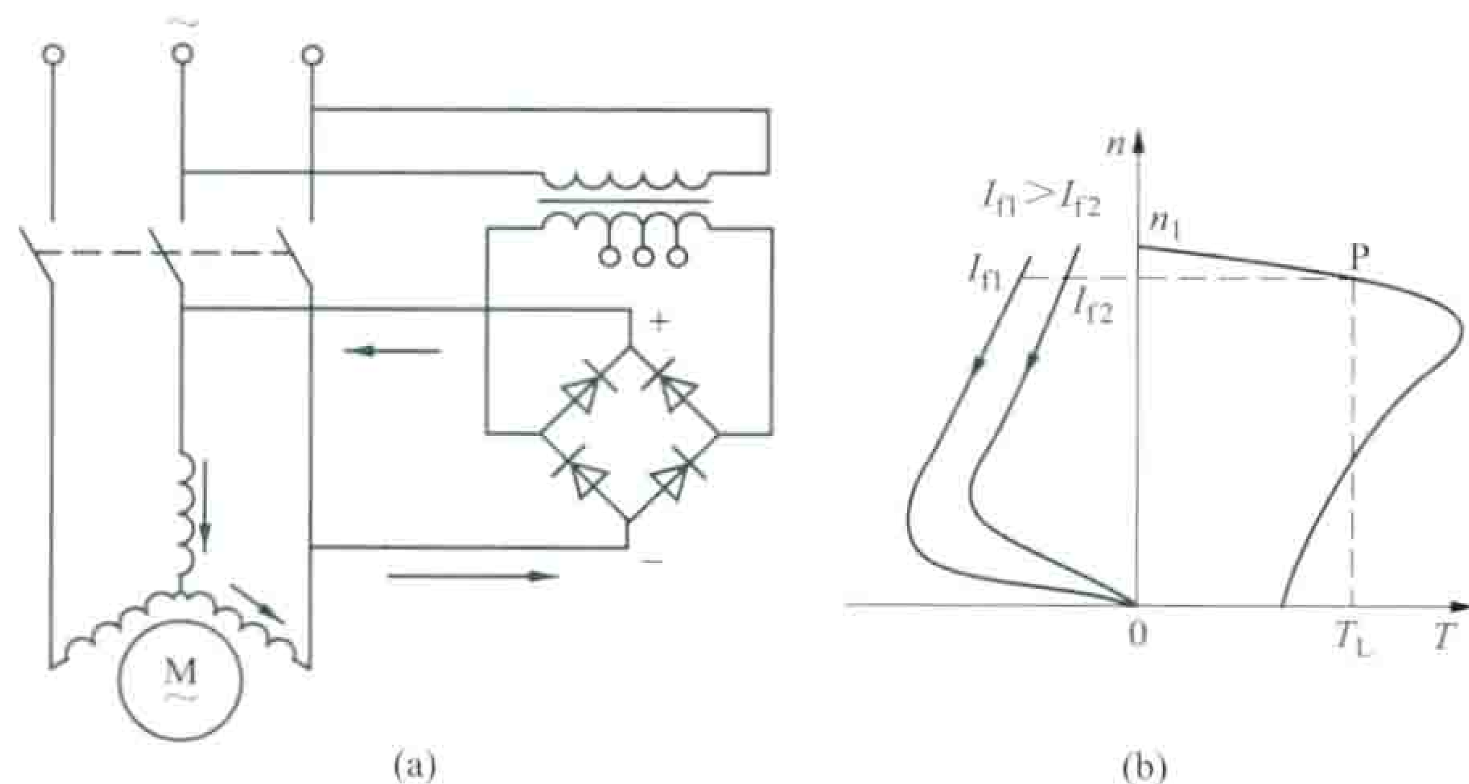


图1 感应电动机的能耗制动
（a）典型接线图；（b）机械特性

（2）同步电动机能耗制动。其接线如图2所示。能耗制动时，将运转的同步电动机从交流电网断开，并立即将定子绕组接到制动电阻（R_z）上（或频敏变阻器上），并保持励磁电流不变，同步电动机靠惯性作用拖动旋转而向制动电阻供电，成为发电机运行，此时产生的电磁转矩为制动转矩，机械系统储存的动能转换成电能消耗在制动电阻上，电动机将迅速停转。

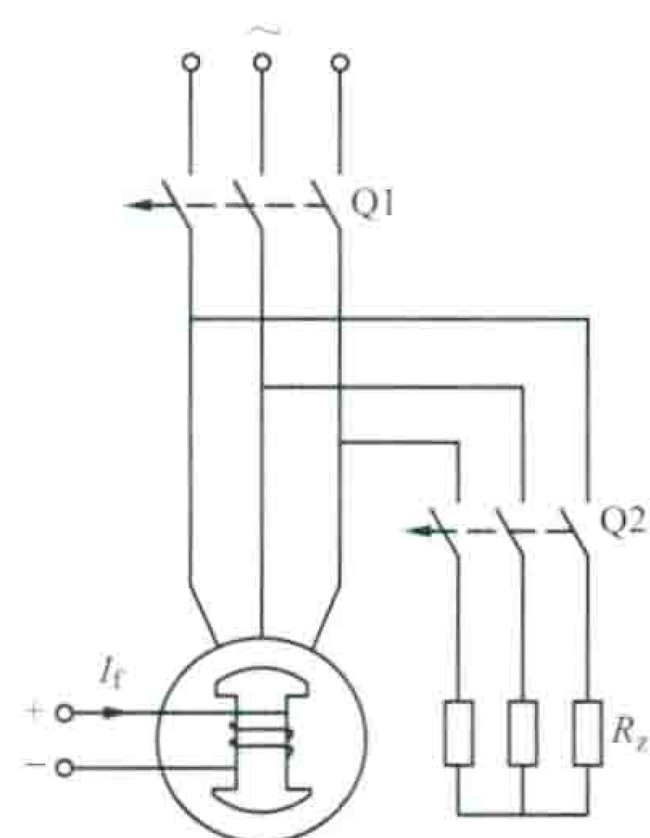


图2 同步电动机能耗制动接线

反接制动 常用于需要迅速停车或迅速反转的生产机械中。它分为正转反接制动和正接反转制动两种。

（1）正转反接制动。将正在电动状态下运行的感应电动机的定子三根供电线中任意两根对调，由于改变了定子电流相序，所产生的旋转磁场立即反转，从原来与转子转向一致改变为与转子转向相反，于是电动机运行于转差率 $1<s<2$ 的正转反接制动状态，产生的电磁转矩对转子起制动作用。当转速降至零时，必须立即断开电源，否则电动机将反向起动。其机械特性如图3所示。由于反接制动电流很大，对于绕线转子感应电动机，反接制动时应在转子回路串入附加电阻器（或频敏变阻器），对于笼型感应电动机一般只限用于容量在10kW以下的电动机。

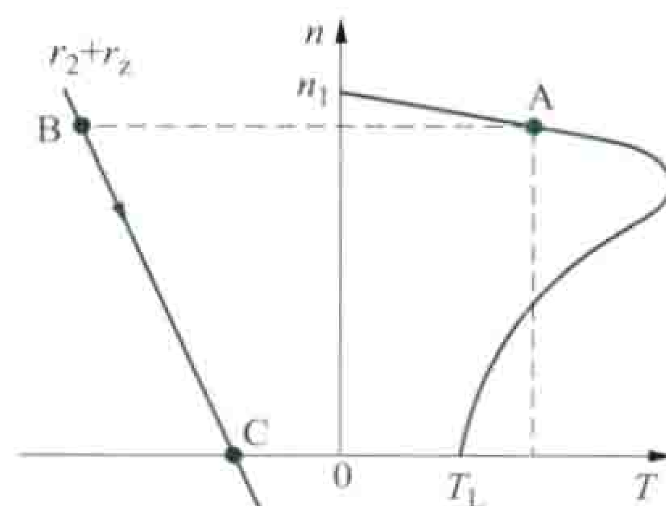


图3 绕线转子感应电动机正转反接制动机械特性

（2）正接反转制动。当绕线转子感应电动机拖动位能性负载，如起重机下放重物时，可保持电动机运行时定子接线不变，而增大串入转子回路的电阻，使电动机的转速从正转逐渐降至零，然后变为反转。此时转子转差率大于1，处于正接反转制动状态，从而保证重物下降。改变转子串入电阻可以获得不同的下降速度。绕线转子感应电动机正接反转制动机械特性如图4所示。

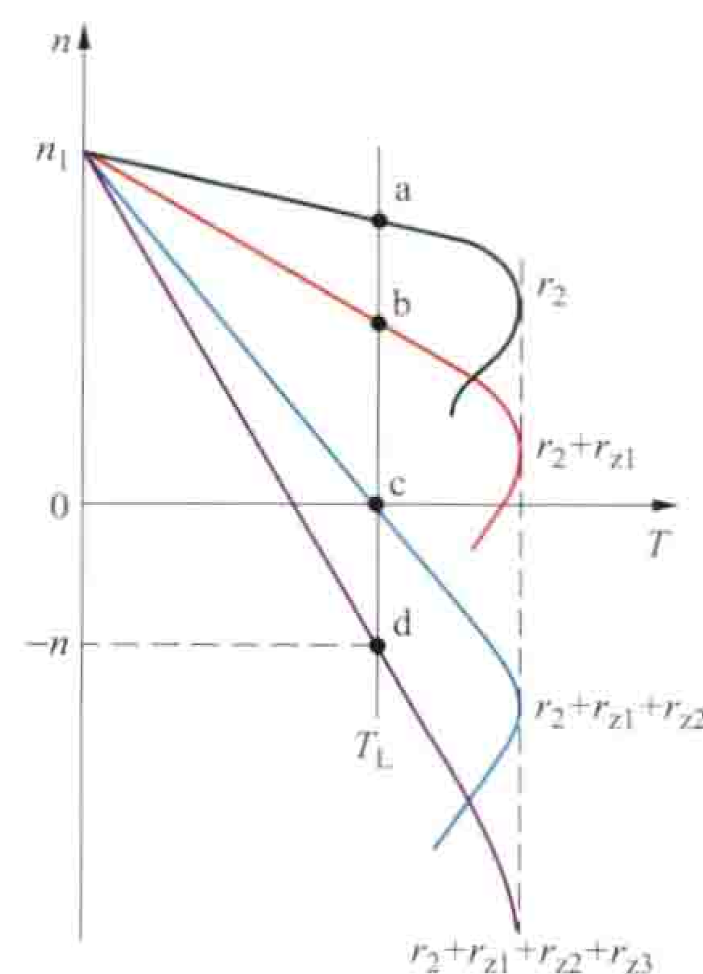


图4 绕线转子感应电动机正接反转制动机械特性

回馈制动 又称再生制动。用于带位能性负载或惯性作用而超速的感应电动机。位能性负载，如起重机提升与下放重物这类负载，不论运动方向如何，重力作用总是向下的，重力转矩的方向也总是不变的。当电动机被位能性负载或惯性作用驱动转子转速超过同步转速时，感应电动机即成为发电机运行，此时的有功电流和电磁转矩改变方向，从而制止转速的进一步增加，起到了制动作用。感应电动机回馈制动机械特性如图5所示。图中P点为发电机运行时的工作点。

回馈制动常用于起重机下放重物时的制动。感应电动机变极调速中由少极数变为多极数，或变频调速中由高频调为低频时，由于同步转速突然下降很多，使转子转速高于同步转速，此时感应电动机也处于回馈制动状态。通过感应电动机的转矩控制，使电动机的电磁转矩低于负载转矩，或者改变电磁转矩的方向，也可以实现回馈制动。

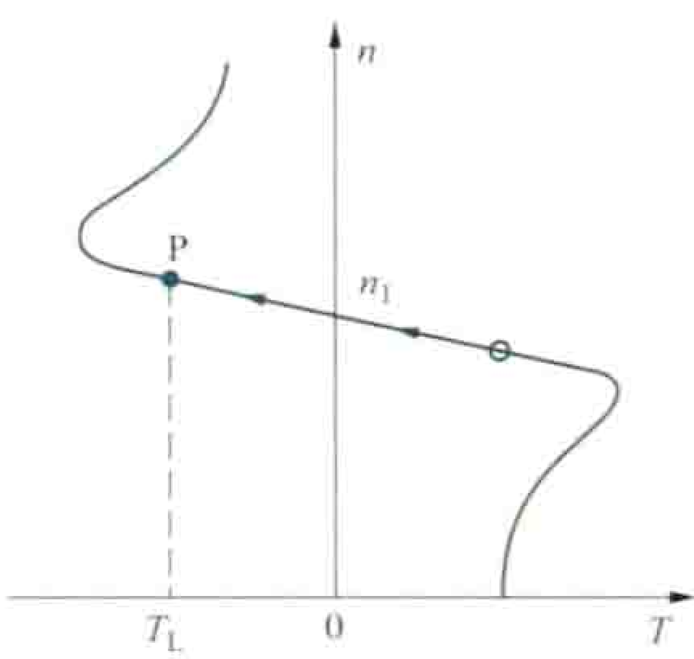


图 5 感应电动机回馈制动机械特性

软制动 随着电力电子技术的进步和发展，软起动器（或固态软起动器，见起动器）正在推广应用。软起动器不仅能实现交流电动机软起动（见交流电动机起动），还能实现交流电动机软停车、软制动。软停车改变了常规关机时停止供电由机械阻力矩使电动机停车的方法，而是使电动机的工作电压由额定电压逐步减少到零。在软停车的控制中，晶闸管导通角 α 逐步改变，使电动机的工作电压逐步降低，直至电动机停车。图 6 所示为软停车的电压特性曲线。

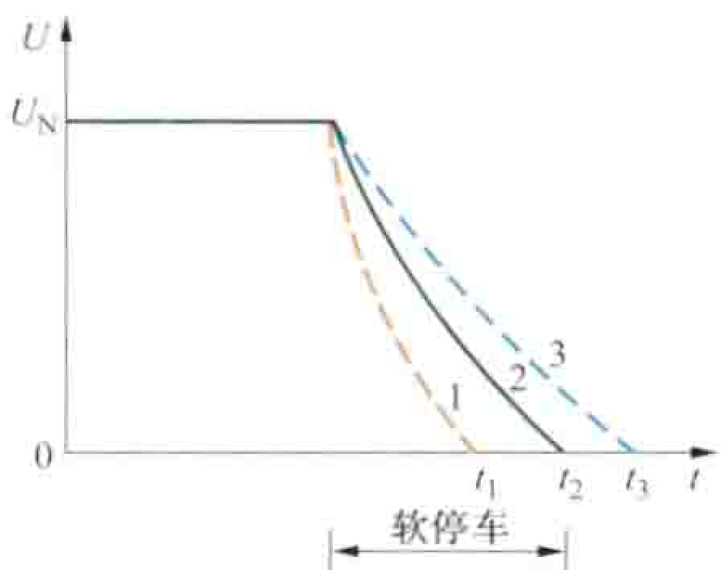


图 6 软停车的电压特性曲线

从图 6 中可以看出，软停车的电压变化率是可以任意设定的，如曲线 1 或 2，也就是说停车的时间可以根据负载的特性和电动机工作情况加以调整。这种软停车适用于水泵类负载的停车控制。因为拖动水泵类负载的电动机若突然断电而停止工作，会由于水流的巨大惯量而产生水击，容易造成水泵损坏。

在软制动的控制中，一般可采用能耗制动技术，即制动时除停止供给电动机交流电源外，同时给电动机定子绕组通入直流电，由此产生的制动转矩使电动机快速停车。图 7 所示为软制动主回路原理图。

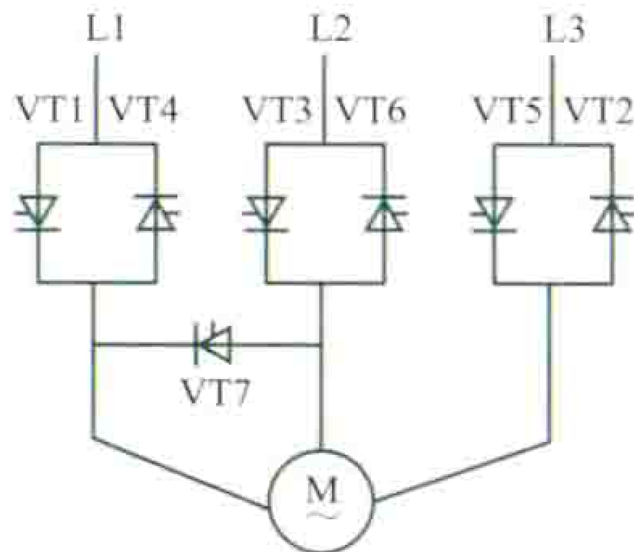


图 7 软制动主回路原理图

软制动时，将原来用于软起动时工作的晶闸管 VT1～VT6 只保留 VT1 和 VT6 继续工作，其余则关断，另外还打开续流晶闸管 VT7。为避免制动时的冲击，晶闸管 VT1、VT6 和 VT7 的导通角应逐渐变化，其变化速率可以进行调整。

在这种软制动的控制中，电动机的转速由额定转速 n_N 能快速而平稳地减速至停车，或减速至一定转速（如 $10\%n_N$）时发出控制信号使机械抱闸动作，达到准确停车的目的。图 8 所示为软制动的转速特性曲线。

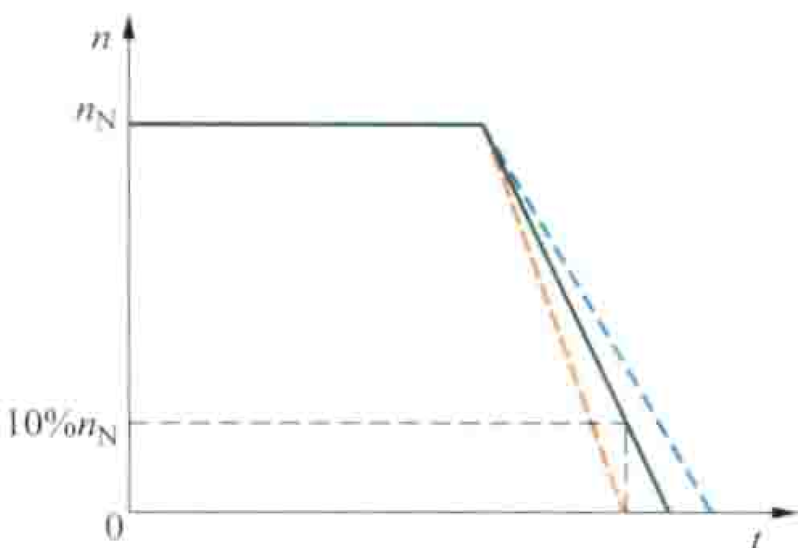


图 8 软制动的转速特性曲线

在软制动过程中，其制动控制电流的变化率是可调的，也就是制动时间是可调的。这种软制动适用于设备要求精确定位制动控制的场合。

在软制动的控制中，除采用能耗制动技术的控制方案外，为增大制动转矩，以及使电动机在制动时三相绕组发热均匀，还可采用反接制动技术的控制方案以及其他控制策略。

jiaoliu dianqihua tielu de fuxu yingxiang

交流电气化铁路的负序影响 （negative sequence interference of AC electric railways） 交流电气化铁路的单相牵引负荷会造成电力牵引变电所一次侧三相负荷电流不平衡，任一三相不平衡系统均可用对称分量法分解成正序、负序和零序三组对称分量的叠加，从而在电力系统中产生负序影响，包括负序电流和负序电压两个方面。接入电力系统线电压间的单相负荷不产生零序分量，只有正序和负序分量。负序电流、负序电压的有害影响有：①可在同步发电机转子中产生附加损耗和局部发热，造成系统出力下降；②负序电流产生的负序转矩，使发电机振动，影响安全运行；③增大系统中各输电环节的损耗；④负序电压的存在对系统中三相电动机用户产生不利影响，造成电动机三相电流不对称和附加损耗，使出力下降并危及电动机安全。

牵引变电所的负序电流 牵引变电所负序电流取决于两供电臂负荷的相位和幅值，因此可以把牵引变电所看作是一个负序电流源。

变压器为 YNd11 接线的三相牵引变电所在两臂用电功率因数相同时的负序电流相量图如图 1 所示。图 1 的上方为供电臂电流和变压器二次绕组的三相电流相量；中间为正序电流相量；下方为负序电流相量。不同供电臂产生的负序电流有 120°相位差。因此，牵引变电所负序电流以仅有一臂有

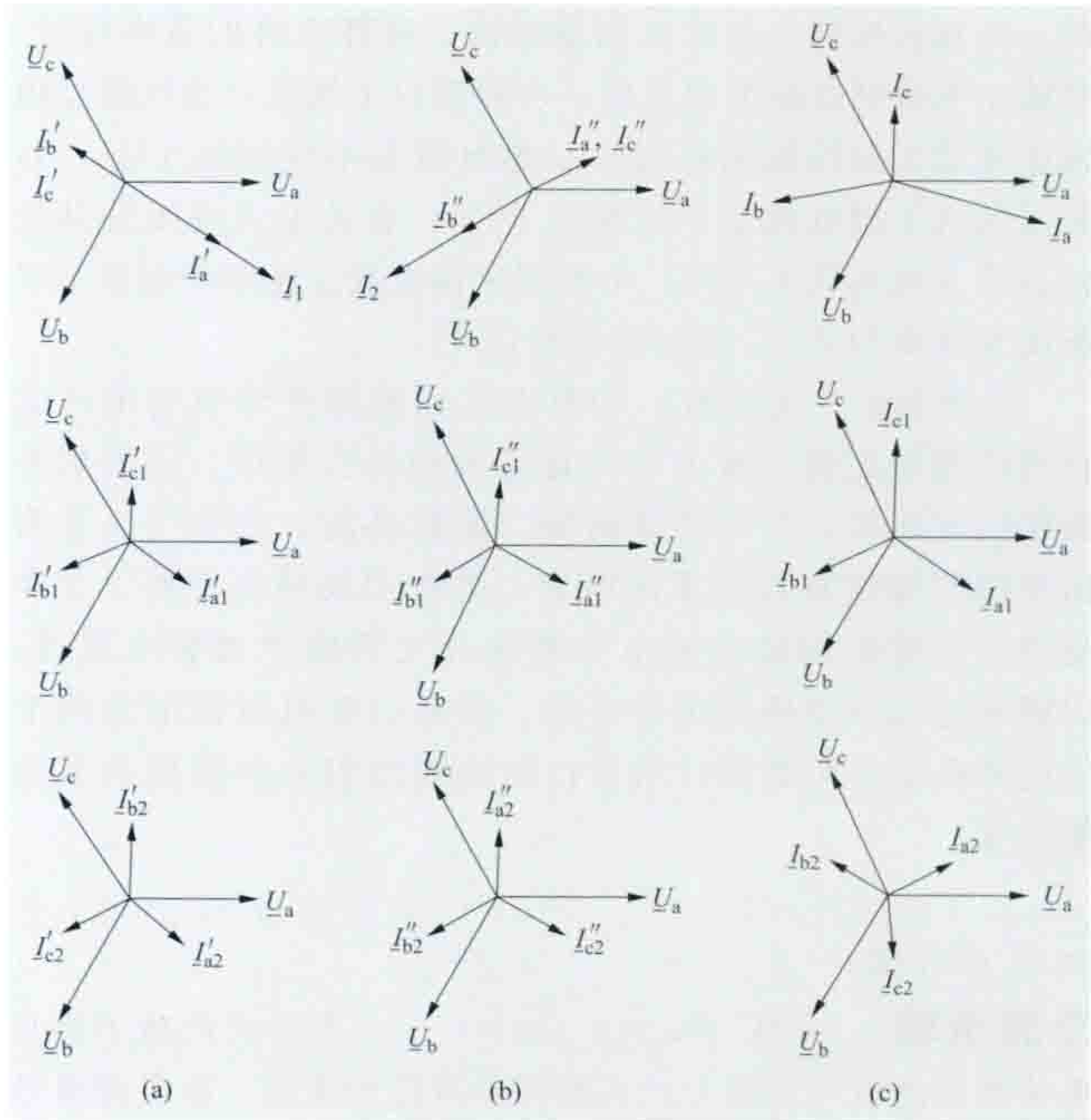


图 1 变压器 YNd11 接线的三相牵引变电所负序电流和负序电压相量图

(a) 仅引前相供电臂（a 相）有负荷时正、负序电流的相量图；
(b) 仅滞后相供电臂有负荷时正、负序电流的相量图；
(c) 两臂均有负荷时正、负序电流的相量图

负荷时为最大，而负序电流的相位则可在120°范围内变动。

在相同牵引负荷条件下不同牵引变电所接线的负序电流有很大差别。牵引变电所的负序电流水平可用负序电流系数K_i来表征

$$K_i = \frac{\text{负序分量}}{\text{正序分量}} \times 100\% \quad (1)$$

图2所示为几种不同接线牵引变电所的负序电流系数曲线。由图可见，当只有一个供电臂有负荷时，各种接线牵引变电所的负序电流系数均相同，达到最大值100%。在两臂均有负荷的条件下，K_i值将视两臂负荷比值变化获得不同程度的改善。其中以平衡接线牵引变电所的K_i值下降最多，当两臂负荷相等时，K_i值降为零。

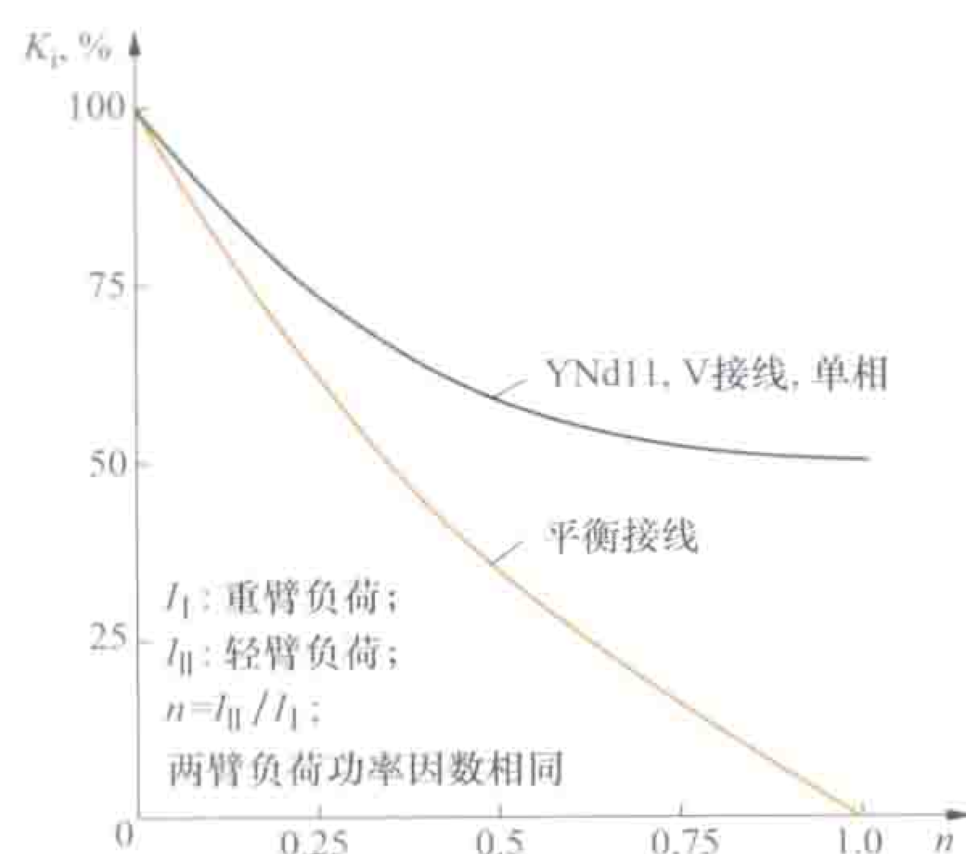


图2 不同接线牵引变电所的负序电流系数

牵引变电所的负序电压 负序电流在流经电力系统负序网络时，可在系统各处产生负序电压，其值为

$$U_2 = I_2 X_2 \quad (2)$$

式中U_2为电力系统某处的负序电压，V；I_2为负序电流，A；X_2为归算至该处的负序阻抗值，Ω。

牵引变电所产生的负序电压以该负序电流源母线处为最大，随着负序电流逐渐分散进入电力系统，系统各处的负序电压水平将逐渐下降。

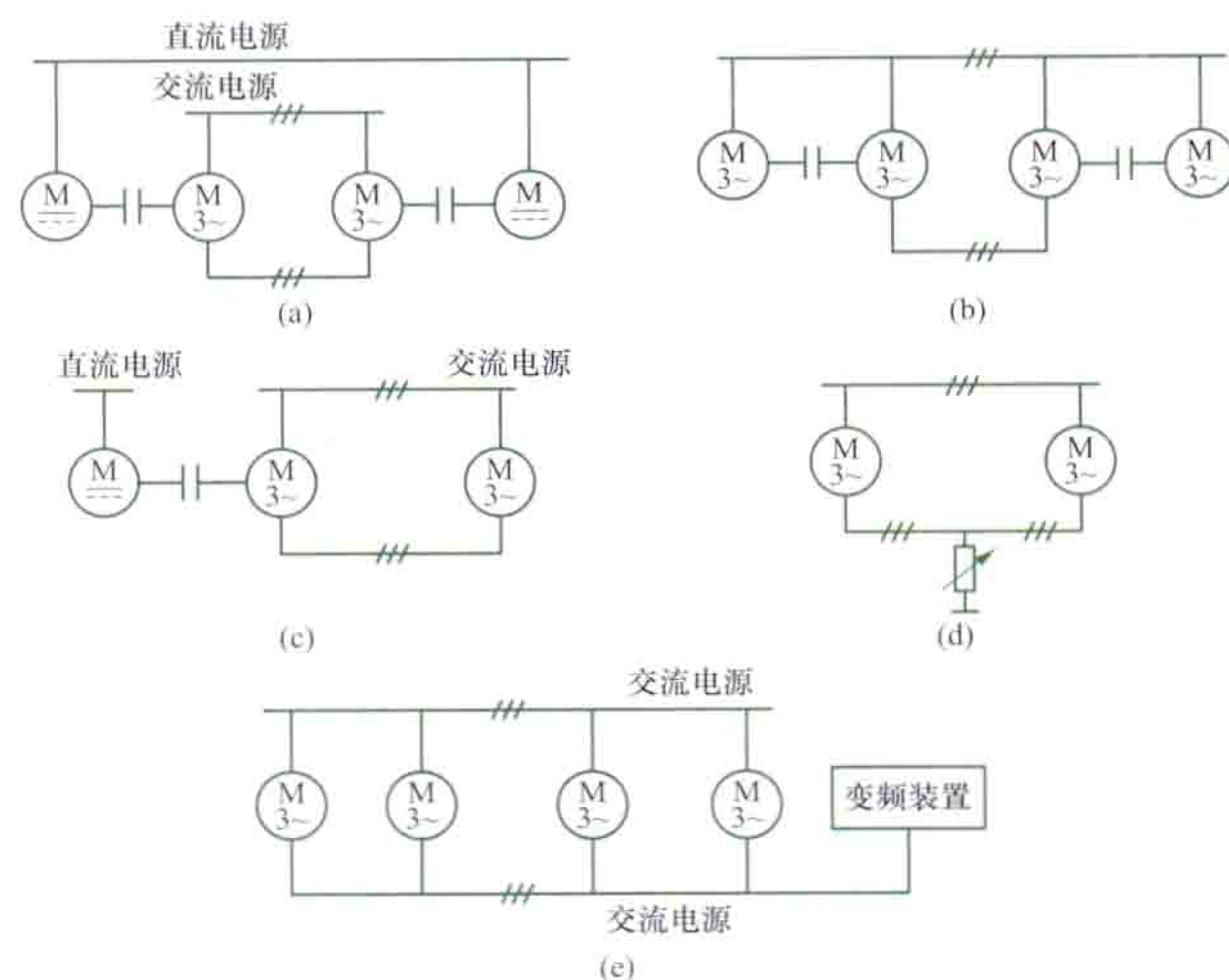
允许标准 不同类型发电机的负序承受能力不同，为此，首先应根据有关电机制造标准，选择允许的负序标准。在缺少电机制造标准规定时，可参照以下规定：当汽轮发电机在额定工况连续运行时，三相电流差不应超过10%；水轮发电机三相电流差不应超过20%；有关电力系统公共连接点的三相电压不平衡，中国国家标准规定正常的电压不平衡度允许值为2%，短时不得超过4%。

改善措施 主要有：①对电气化铁路各牵引变电所实行进线相序轮换，减少电气化区段的综合负序。②采用平衡接线变压器，主要有斯科特、阻抗匹配、列布兰、变形伍德桥等接线方式或采用电容、电抗实现动态平衡。③在受负序电流影响最大的电力系统分支回路中加装电抗器，以限制进入该支路的负序电流。④牵引变电所供电的两个供电臂负荷尽可能设计均衡；在运输组织上尽量使列车均衡发车。

jiaoliu dianzhou

交流电轴 (AC electric shaft) 多台绕线转子感应电动机通过电气连接方式实现同步运转的系统。通常将型号完全相同的两台以上绕线转子感应电动机连接起来，产生与以机械轴相连的同等效果，使各传动轴同步运转，因此称为交流电轴。也可采用定子电压相等、转子电压相等、极对数相等但功率不等的电动机。交流电轴可用于龙门吊、船闸闸门、水库启闭机、大型金属切削机床和冶金工业中的飞剪等生产机械。

交流电轴的主要连接方式如图所示，分为：①具有主传动电动机和辅助平衡电动机的电轴系统［如图（a）、（b）、（c）所示］；②具有公共变阻器的电轴系统［如图（d）所示］；③具有公用变频装置的电轴系统［如图（e）所示］。第一种系统适用于转速范围宽、不平衡力矩大的场合。第二种系统适用于转速范围窄、不平衡力矩小、投资省的场合。第三种系统适用于转速范围宽、不平衡力矩大、传动点数多的场合。



交流电轴的主要连接方式
(a)(b)(c)具有主传动电动机和辅助平衡电动机的电轴系统；(d)具有公共变阻器的电轴系统；(e)具有公用变频装置的电轴系统

为了保证交流电轴的正常同步运转，在设计使用时应当注意以下几点：①采用公共变阻器的电轴系统中的线绕转子感应电动机的同步转速要比机器运转所需的转速高20%～30%，以保持一定的滑差维持平衡力矩。②对电轴系统定、转子回路的连接导线要有足够大的截面积，以免导线截面小、电阻大而影响平衡力矩。③要考虑电网电压降低对平衡力矩的严重影响。④对电轴系统在起动以前要先单相整步后再起动。在停车时要停车后再断电轴系统定、转子电源和回路，以保持同步制动。

jiaoliu-jiaoliu zhijie bianpin tiaosu

交流-交流直接变频调速 (variable frequency AC motor speed control by direct AC-AC converter) 采用交流-交流直接变频器实现交流电动机调速的技术。交流电动机的极对数一定时，其同步转速与供电电源频率成正比，改变频率就能调节电动机的转速（见变频调速）。交流-交流直接变频器是直接将恒压、恒频的交流电通过电力电子变流器变换为变压、变频的交流电源，供电给交流电动机进行调速。传统的交流-交流直接变频器是指采用晶闸管换流的交流-交流变频器，采用全控开关器件构成的矩阵变换器已应用在交流变频调速中（见矩阵变换器变频调速）。

常用的交流-交流直接变频调速线路如图1所示，均采用三组晶闸管反并联可逆变流装置构成三相输出。

交流-交流直接变频器 一般指传统的由晶闸管构成的

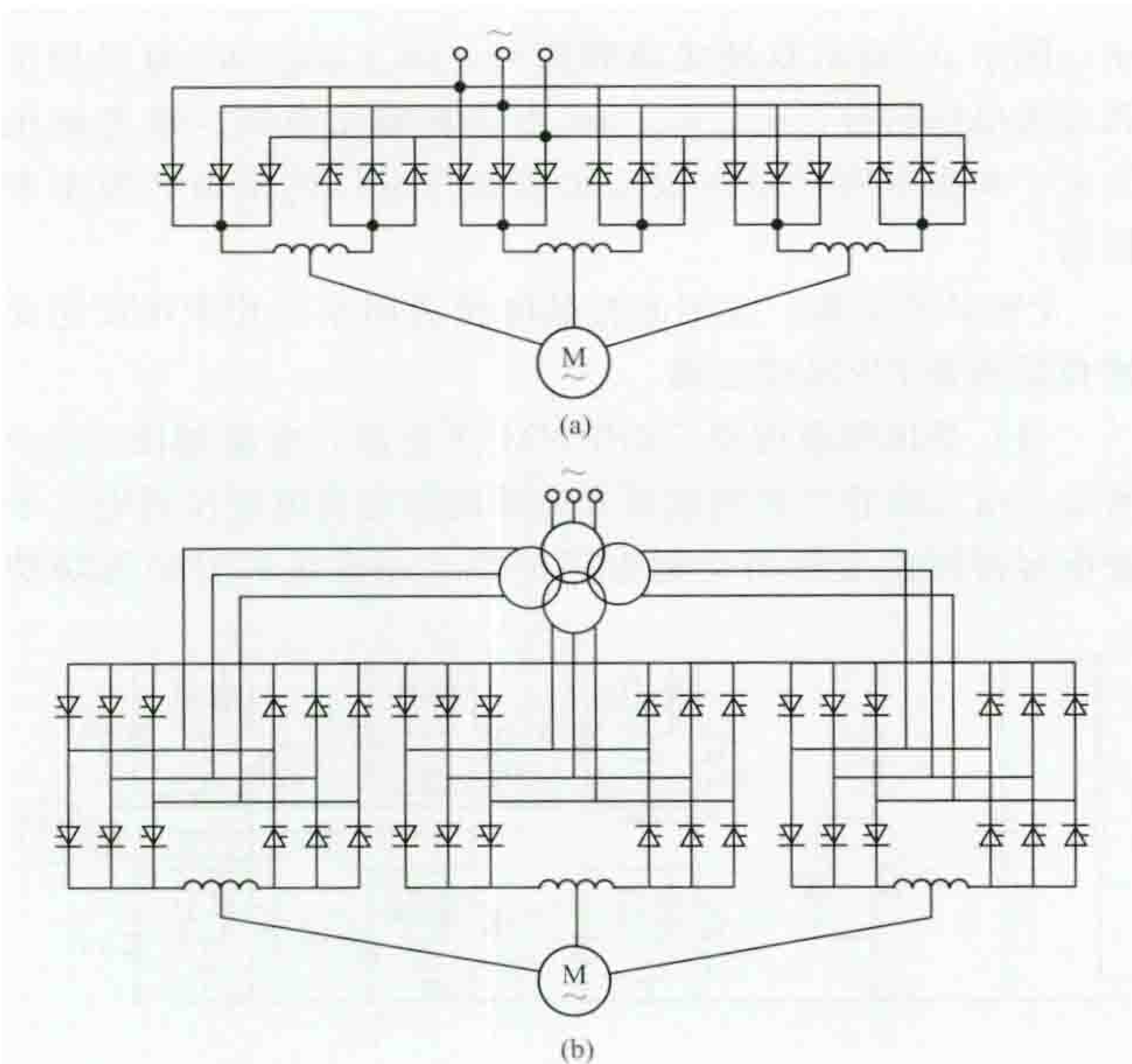


图 1　交流-交流直接变频调速线路

(a) 三相零式线路；(b) 三相桥式线路

交流-交流变频器，又称直接变频器或周波变流器。它可分为电压型和电流型两种。（见变频器）

（1）电压型交流-交流变频器。变频器实际上由正、反两组整流器组成，这些整流器根据负载电流的极性交替控制通断，以便给负载提供交流电流。对相控整流电路而言，当控制角 $\alpha=0$ 时，输出电压最大；$\alpha=\pi/2$ 时，输出电压为零。如果变频器的正、反两组整流器交替地连续改变 α 角，可以得到逼近正弦波型的平均输出电压。α 角由零变至 $\pi/2$，平均电压由正最大减小至零，在电压正半波内；α 角进一步增大，平均电压变为负值，在电压负半波内。按一定方式控制 α 角，使其在 α_0（$>0°$）$\sim\pi-\alpha_0$ 的范围内来回变动，可使平均输出电压按正弦规律变化，正、反组整流元件轮流处于整流、逆变、阻断状态。为了使正、反两组整流桥的输出电压始终相等，它们的控制角之和应保持为 180°，但两者的输出电压瞬时值仍有差别，正、反组之间将出现环流。限制环流可以用电抗器，这种运行方式称为有环流运行方式。如将另一组加以封锁，则称为无环流运行方式。但完全无环流时，负载电流进零处会使输出波形发生畸变和容易断续，因而可采用局部环流方式运行，即当电流小到有不连续趋势时，按有环流方式工作，这时只需要较小容量的电抗器。由于负载电动机的反电动势也为正弦波，故电流也是正弦波，因而电压型交流-交流变频器又称为正弦型交流-交流变频器。改变 α_0 值（即在 $\alpha=\frac{\pi}{2}$ 两侧变化的范围），就可改变输出电压的幅值。改变控制信号周期性变化的频率，即可改变输出电压的频率。

（2）电流型交流-交流变频器。其主电路与电压型交流-交流变频器基本相同，只是主回路中设有滤波电抗器，其控制系统更为简单。三相变频器中各组（相）整流电路按一定的顺序导通，导通时间为 $2\pi/3$，相互间隔时间为 $\pi/3$，同一时刻有一个正组和一个反组同时导通，但不允许同一桥臂的两组同时导通，否则会造成电源短路。如滤波器电感足够大，电流波形呈现矩形波，负载的每相电流为电源三相电流之和。改变相位控制角，可以保持一定的输出电流大小；改变各组（相）间换流的频率，可以改变输出电流的频率。

控制系统　电压型交流-交流直接变频调速系统的原理框图如图 2 所示。采用函数发生器可使输出电压与频率的关系按照要求进行协调控制，并有电流正反馈以补偿阻抗压降，可保证电动机的过载能力和轻载时弱磁运行。输出频率由电压 u_G 给定，一路经压频变换器，再经时序电路进入三相数模转换器，决定其输出频率；另一路经函数发生器输出与输出频率相应的电压幅值 u_R，进入三相数模转换器。三相数模转换器输出电压即为与给定值相对应的三相基准电压。再经过比较器形成触发晶闸管的触发角，并产生触发脉冲，经放大后触发晶闸管。电流型交流-交流直接变频调速系统的控制原理与电压型交流-交流直接变频调速系统类似。

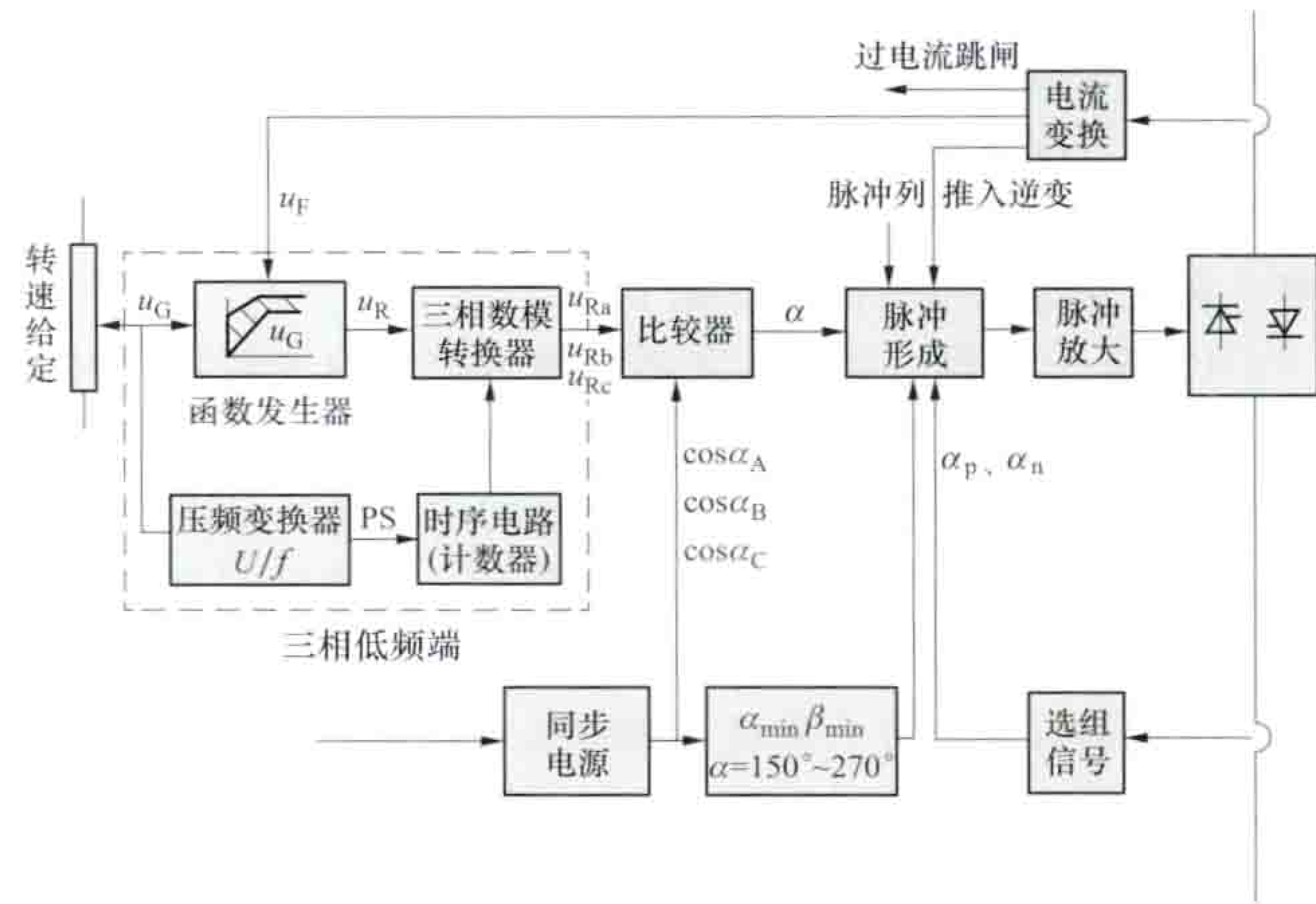


图 2　电压型交流-交流直接变频调速原理框图

交流-交流变频器中，交流输入侧会产生很大的无功功率，使电源设备利用率降低。交流输入侧存在高次谐波电流，将使电源电压的波形发生畸变。如要降低无功功率，可采用中点偏压法、环流控制法、级联法等控制方法。如要降低高次谐波，可采用输出电流波形控制法、两台交流-交流变频器协调运行等。

特点及应用　交流-交流变频器为一级（直接）换能，效率可高达 90% 以上；其换流为电源自然换流，不需要辅助换流电路，简化了主电路；直接变频容易实现四象限运行。但由于交流-交流变频器中晶闸管是靠电网电压进行换流，变频器最高输出频率不超过电网频率的 1/2～1/3，否则，输出波形将发生严重的畸变和不对称。因此，交流-交流直接变频调速适于低速大容量的电动机负载，如球磨机、矿井提升机、轧钢机、卷扬机、风洞等传动；或者将中频变为较低频率供电给电动机进行调速，如电动车辆上将 1000Hz 中频发电机的电能转变为 400Hz 以下的电能供给电动机进行调速。如果交流-交流变频器所带负载是容性的，例如在无换向器电动机中，电流超前于电压，或者采用其他措施进行强迫换流，使晶闸管能及时关断，则交流-交流变频器的输出频率将不受限制，甚至可以做到输出频率高于电源频率，从而实现对高速电动机进行调速。若采用矩阵变换器代替晶闸管构成的交流-交流变频器用于交流-交流直接变

频调速，则可以克服输出频率范围小的缺点，且交流输入侧可实现高功率因数和低谐波电流（见矩阵变换器变频调速）。

jiaoliu maikuan tiaozhi bianpin tiaosu

交流脉宽调制变频调速 （speed control of AC motor by PWM converter） 在交流-直流-交流变频调速系统中，采用脉冲宽度调制（pulse width modulation，PWM）实现交流电动机调速的技术。交流电动机的极对数一定时，其同步转速与供电电源频率成正比，改变供电电源频率就能调节交流电动机的转速（见变频调速）。脉冲宽度调制（简称脉宽调制）技术是1969年德国人A. 舍龙（A. Schonung）等把通信系统中的调制技术应用于交流电动机调速中而提出的，70年代后期得到了发展，80年代利用这种技术的调速控制已进入实用阶段，已得到广泛应用。脉宽调制控制技术，是将载频信号与参考电压信号进行比较，发出调制信号控制变频器开关元件的通、断，使其输出端获得矩形脉冲波形，通过改变载频信号或参考电压信号的频率和幅值，可改变输出脉冲的宽度或幅度及频率，随之改变基波输出电压和频率，即改变交流电动机供电电源的电压和频率，实现交流电动机的速度调节。

PWM变频器 利用脉宽调制技术控制的变频器。对于一般的工业应用，PWM变频器的整流器部分由二极管桥式整流器和LC滤波器构成，基波频率的输出电压是在逆变器内部以多脉冲脉宽调制方法进行控制的。脉宽调制方法有多种，为使输出电压接近正弦波形，多用正弦波脉宽调制方法。从控制方式上分为单极式和双极式两种。

（1）单极式正弦波脉宽调制。调制波形如图1（a）所示，图中 u_c 为载频信号，u_r 为参考电压信号，u_a 为三相输出电压中的a相电压，u_{a1} 为a相基波电压。载频信号为单极式等腰三角形波，参考电压信号则为单极式正弦半波串，三相逆变器中的参考电压信号应互差120°。输出电压的大小和频率都由参考电压信号控制。当改变 u_r 的大小时，输出电压的大小随之改变；当改变 u_r 的频率时，输出电压的频率随之改变。其输出波形接近于正弦波形。

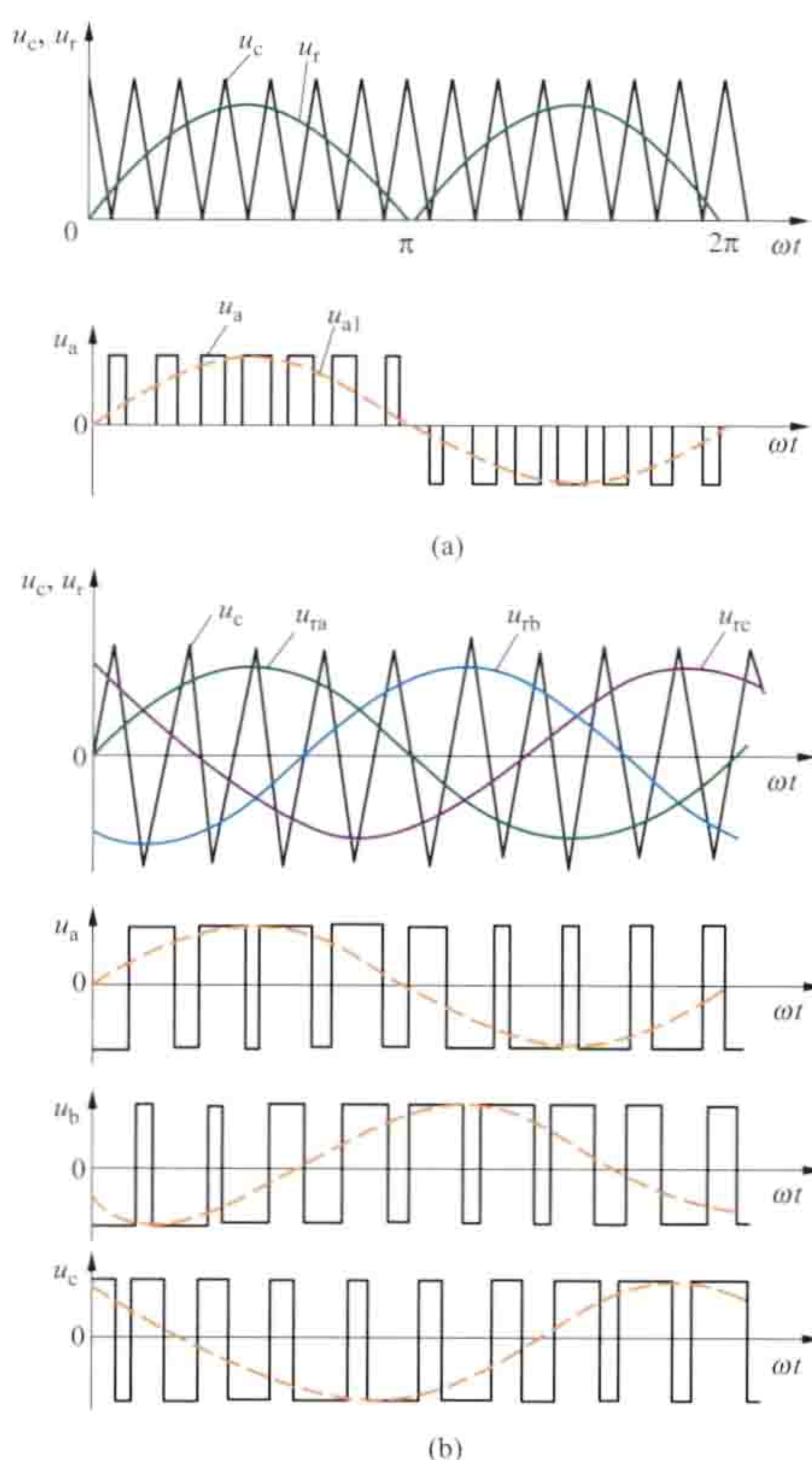


图1 正弦波脉宽调制的波形
（a）单极式调制；（b）双极式调制

（2）双极式正弦波脉宽调制。调制波形如图1（b）所示，图中 u_c 表示双极式载频信号，u_{ra}、u_{rb}、u_{rc} 为三相正弦参考电压信号，u_a、u_b、u_c 为三相输出电压。输出电压的大小和频率同样是由改变正弦参考电压的幅值和频率来控制。

PWM逆变器 常用的有晶体管通用型三相PWM逆变器和晶闸管PWM逆变器。

（1）晶体管通用型三相PWM逆变器。电路如图2（a）所示，由二极管三相整流桥变流器的恒定直流电压供电。平波电容器使逆变器与交流电网去耦，并提供必要的无功功率。为了能实现四象限运行，直流侧接入制动电阻和晶体管，当负载电动机工作在再生发电状态下，回馈能量将通过回馈二极管V11～V16向电容C充电。为避免直流电压过高，晶体管V27导通使部分回馈能量消耗在制动电阻上。此时，由于晶体管仍处于调制工作状态，必将出现电动机两端线间经导通的二极管和晶体管短接的情况，因此必须采取措施，当短接电流超过允许值时，需封锁晶体管，以免管子损坏。晶体管通用型三相PWM逆变器中的晶体管开关器件多采用绝缘栅双极性晶体管（IGBT）或功率MOS场效应晶体管（P-MOSFET），采用IGBT的交流-直流-交流电压型PWM变频器电路如图3所示。

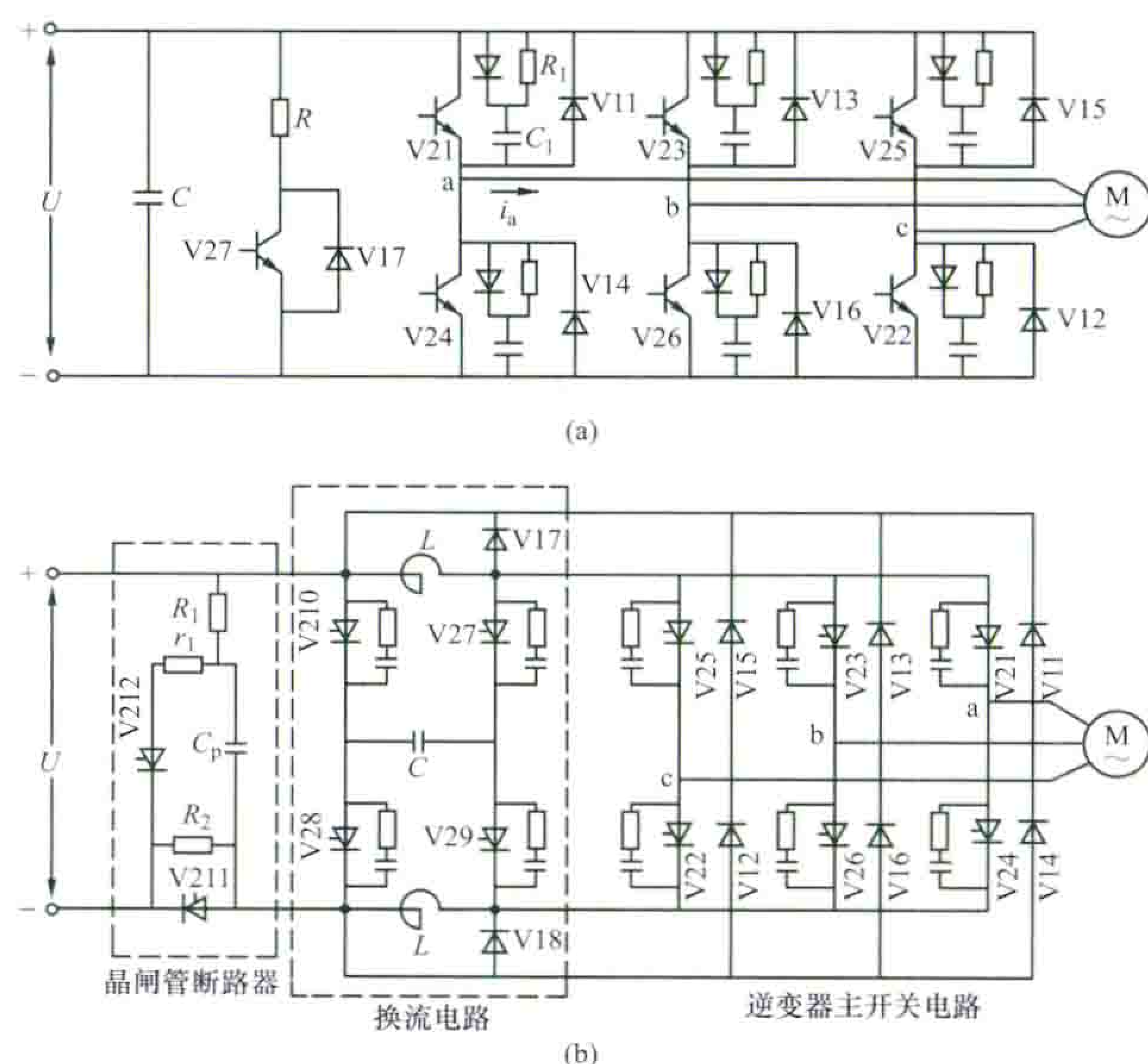


图2 交流脉宽调制逆变器电路
（a）晶体管通用型三相PWM逆变器；
（b）集中式强迫换流型晶闸管三相桥式PWM逆变器

（2）晶闸管PWM逆变器。根据换流方式的不同，有多种构成形式。普通晶闸管本身没有自关断能力，而PWM逆变器中要求在输出的半个周期内通断换流多次，因而晶闸管不能采用自然换流方法换流，也不能加辅助开关元件进行换流，必须另外附加一个换流电路，按脉宽调制的要求及时进行强迫换流。图2（b）所示为集中式强迫换流型晶闸管三相桥式PWM逆变器电路。晶闸管V21～V26和二极管V11～V16组成逆变器主开关电路，V27～V210和电抗L、电容C构成换流电路，V211、V212和电容 C_p、电阻 R_1、R_2 等组成晶闸管过载保护环节。当负载电动机工作

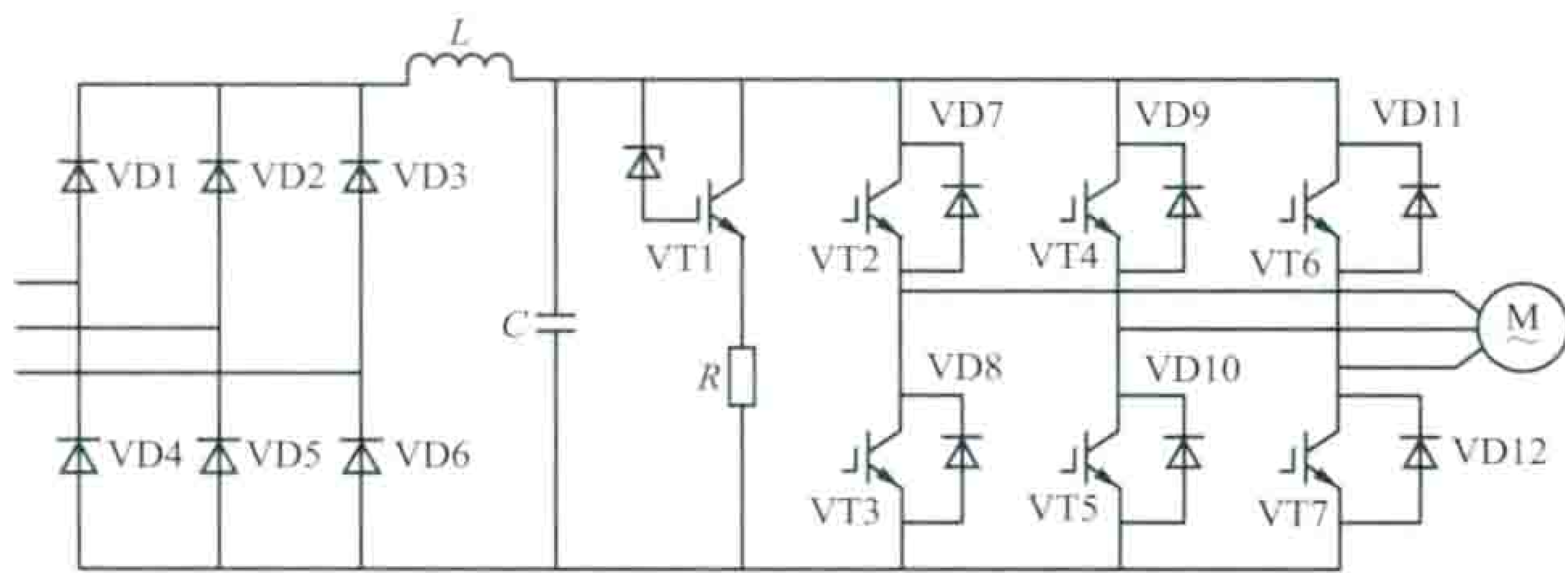


图 3　采用 IGBT 的交流-直流-交流电压型 PWM 变频器电路

在再生发电状态时，反馈电流经过续流二极管 V11～V16 流入直流侧。用电抗 L 限制通过晶闸管反馈电流的上升率，可以避免反馈电流被直接短路。二极管 V17、V18 为电抗 L 的续流二极管，当直流侧电流减小时可以避免在逆变器两端出现过电压。

PWM 变频调速系统　除主电路外，主要包括频率给定、U/f 变换器、载频信号发生器、调制系数及脉冲数（m，N）控制器、PWM 调制器、逻辑电路、触发电路等。图 4 所示为可关断晶闸管准正弦波脉宽调制（SPWM）变频调速系统原理框图。载频信号与 U/f 变换器输出脉冲同步，为幅值恒定的等腰三角形波，PWM 调制器输出准 SPWM 波（阶梯形参考电压信号与三角波载频信号的调制输出波）。输出电压基波幅值正比于调制系数 m（阶梯形参考电压信号最大幅值与三角波载频信号幅值之比），输出电压的频率正比于载频频率。调速时，改变频率给定值，U/f 变换器输出脉冲的频率相应地改变，载频信号发生器产生同频率、幅值恒定的三角波。按要求的电压频率比改变调制系数 m，经过调制后即可按给定的电压和频率输出，从而改变电动机的速度。

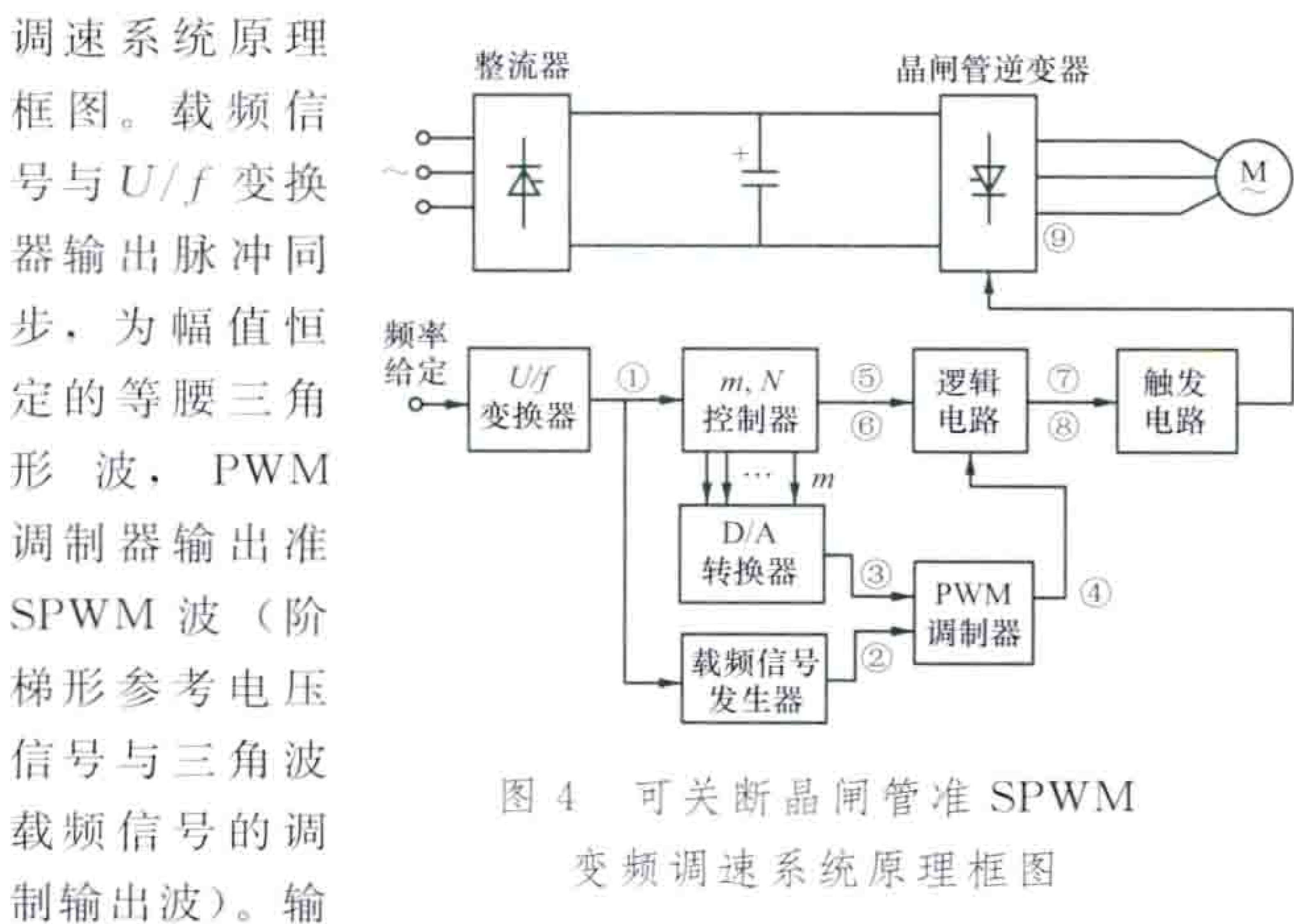


图 4　可关断晶闸管准 SPWM 变频调速系统原理框图

调速系统的实现方式大体可分为模拟电路控制、微机控制（包括单片机 MCU 和数字信号处理器 DSP）和数字模拟混合控制。微机控制发展很快，已在实际应用中成为主流。

特点及应用　交流脉宽调制变频调速的优点是：主电路结构简单，电网侧功率因数高，输出电压波形近似于正弦波，电压调节速度快，调压调频范围广，能扩大调速范围。若采用晶闸管 PWM 逆变器，其中晶闸管工作在高频状态，对元件的性能要求较高，开关损耗较大。20 世纪 90 年代以来，采用绝缘栅双极性晶体管和功率 MOS 场效应晶体管等器件构成的 PWM 变频器避免了使用换流电路，同时具有开关频率高、门极驱动功率低、效率高、输出电压波形好、调速范围宽等优点，在实际的交流变频调速系统中已获得广泛的应用。

jiaoliu qianyinwang dui tongxin xianlu de yingxiang

交流牵引网对通信线路的影响　(interference of AC traction network on overhead communication lines)

交流牵引网的电流和电压可在其周围空间产生磁场和电场，并对位于其磁场或电场内的架空通信线路产生磁感应电动势或静电感应电压，对通信设备和人身安全构成危险。牵引电流中的高次谐波分量（见电力牵引高次谐波）还可在通信线路中产生杂音干扰电动势，影响通话质量。

影响分类及标准　分为危险电压影响和杂音干扰影响两大类。危险电压影响又可分为由牵引网电场产生的静电感应电压影响和由工频牵引电流磁场产生的纵向感应电动势影响；干扰影响则由牵引电流中的谐波成分引起。

权威的影响标准是由国际电报电话咨询委员会（CCITT）制定的，中国也采用这一标准。其中有关交流电气化铁路的允许标准见表。

交流电气化铁路对通信线路危险电压和杂音干扰电压的允许标准

通信线路种类	感应纵电动势允许值（V）			静电感应电流允许值（mA）	杂音电动势（mV）
	正常	短路事故	条件困难时		
架空线路	60	430	150	15	1.0
电缆线路	60	试验电压的 60%	150		1.0

影响计算　包括静电感应电压、纵向感应电动势、杂音干扰电动势计算。

（1）静电感应电压。处于牵引网电场内通信线路静电感应电压 U_{ij} 的计算式为

$$U_{ij} = \frac{C_{12}}{C_{12}+C_{22}} \times U \tag{1}$$

式中 C_{12} 为牵引网与通信线路间的分布电容；C_{22} 为通信线路与大地间的分布电容；U 为接触网电压。其中 C_{12} 值随接触网至通信线路的距离增加而迅速衰减，当接近距离达 100m 以远时，静电感应电压影响可忽略。

（2）纵向感应电动势计算式为

$$E = \mathrm{j}\omega MI\lambda l \tag{2}$$

式中 ω 为交流电流的角频率；M 为接触网与通信线间互感系数，H/km；I 为牵引电流，A；λ 为牵引网回路的屏蔽系数，在直接供电方式下，约为 0.5；l 为通信线路与接触网的平行接近长度，km。

（3）杂音干扰电动势。人耳可以感知的声音频率在 0.3～3.0kHz 之间，对于不同频率声音的敏感程度也不相同，其中对 800Hz 频率最为敏感。为了评价各次谐波电流综合产生的杂音干扰影响，可将各次谐波产生的谐波电压换算成等效于 800Hz 的综合杂音干扰电压，即

$$U_m = \sqrt{\sum (P_k U_f)^2} \tag{3}$$

式中 U_m 为综合杂音干扰电压，mV；P_k 为不同频率的音响系数；U_f 为某单一频率谐波电流产生的谐波电压，mV。

防护措施　通常可从电气化铁路和通信系统两方面采取措施。在电力牵引供电系统采取的措施有牵引网采用 BT 供电方式（见电力牵引 BT 供电方式）或 AT 供电方式（见电力牵引 AT 供电方式），缩减供电臂长度，设置回流线和装

设 R-C 滤波器等。

（1）牵引网以 BT 方式供电。在 BT 供电方式时，牵引电流基本上全程由回流线返回，只有在机车与变电所侧吸上线间的局部区段才不经回流线而由钢轨返回。这种局部按 T-R 方式供电的长度视 BT 间距和机车取流位置不同而异，最大可达半个 BT 间距。BT 供电方式对减轻感应影响的能力可用屏蔽系数表示

$$\lambda_{BT} = \frac{l_0}{2l} \qquad (4)$$

式中 λ_{BT} 为 BT 供电方式的屏蔽系数；l_0 为 BT 间距，km，一般为 3～4km；l 为供电臂长度，km。

（2）牵引网以 AT 方式供电。AT 供电方式的防干扰特性极为复杂，其计算需依靠电子计算机方能完成。CCITT 于 1979 年对 AT 供电方式的防干扰计算方法发表过“补充文件”。AT 供电方式的防干扰性能有以下特点：①在确定的 AT 网络和通信线路条件下，影响防干扰效果的主要因素为列车位置和取流大小、AT 间距、钢轨对地泄漏电阻和 AT 漏抗。②评价 AT 网络防干扰性能，常采用“感应安培公里”这一指标。对于与整个供电臂全长接近的通信线，可用“全安培公里”这一指标。对于与供电臂部分平行接近的短段通信线，则宜用“单位安培公里”指标。“全安培公里”是指列车在不同位置取流时，由供电臂全长范围产生的总感应安培公里数；“单位安培公里”则是指牵引网单位长度产生的安培公里数。③在一定的列车电流条件下，“全安培公里”与列车取流位置呈复杂关系并与 T-R 方式和 BT 方式时的特性完全不同：在 T-R 方式下，“全安培公里”与列车距变电所的距离成正比；而 BT 方式时则与“半段效应”长度成比例。但在 AT 方式时，不论列车在什么位置用电，整个供电臂全长范围内都有电流流通，而且大致以列车所在位置为界分成两个方向相反的感应区。因此，当列车偏于变电所或分区所一侧时，就可能出现较大的“安培公里”值。当列车处于中部位置时，由于正、负两个感应区的“安培公里”大部分抵消而使“全安培公里”有较大下降。④当供电臂内同时有多于一列车取流时，综合的“全安培公里”和“单位安培公里”一般均较各自产生的安培公里按绝对值相加为小。因此，CCITT 建议，在实际计算中只需考虑 1～2 列车同时取流，而且在求综合“安培公里”时按矢量相加。⑤AT间距对“全安培公里”和“单位安培公里”有较大影响。缩减第一个 AT 段的长度对降低“安培公里”值有特别突出的效果。⑥钢轨对地泄漏电阻对“单位安培公里”有较大影响，但对“全安培公里”则因正、负感应电动势（电压）相抵消而不会发生很大变化。⑦减小 AT 漏抗可使“安培公里”值获得一定程度的减小，但却使 AT 的制造费用大幅度增加，合理漏抗值的确定应兼顾两者。

（3）缩减供电臂长度。

（4）设置架空回流线，可减少牵引回流泄入大地的分量。这种方式的屏蔽效果一般为 60%～80%，效果不大，因此只适宜在感应电压超出允许标准不多的情况下采用。

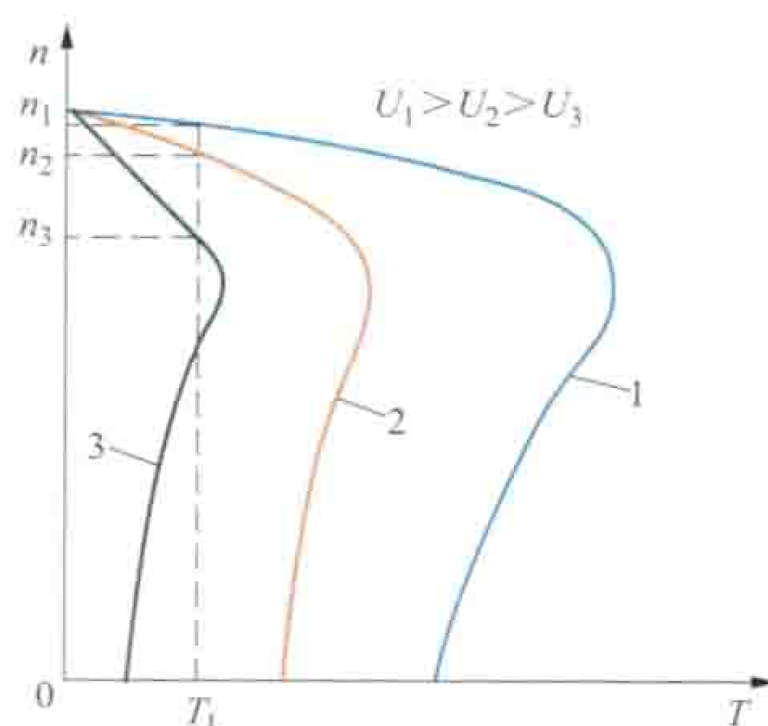
（5）在降低杂音干扰影响方面，可在机车或地面设 R-C 滤波器，以改善牵引电流波形，或者选用谐波含量较小的电力机车或电动车组。

jiaoliu tiaoya tiaosu

交流调压调速　(AC motor speed control by terminal voltage)　改变感应电动机定子电压实现调速的技术。这属于调节转差率调速。（见交流电动机调速）

改变交流电动机定子电压可以改变其转速，如图所示。图中示出了与三个定子电压 U_1、U_2、U_3 对应的转矩-转速曲线 [$T=f(n)$] 1、2、3，由于 $U_1>U_2>U_3$，曲线 1、2、3 的电磁转矩值在同一转速下将依次按电压二次方关系降低。在恒转矩负载 T_L 的情况下，转速分别为 n_1、n_2、n_3。即当定子电压降低时，转速将下降，反之，转速将升高。

调压调速时，既可以从额定电压升高定子电压调速，也可以降低电压调速。但由于升高电压会使电动机磁路饱和，造成空载电流剧增，负载能力下降，实际上只能降低电压调速。因此，交流调压调速是指在额定电压以下的降压调速。由于电压下降引起转速降低，转子回路感应电动势将增大，转子电流也将增大，可能引起过电流。如果转子电阻较大，可以起到限制转子电流、提高电动机功率因数的作用，因而必须采用能防止低速时产生大电流的特殊结构的笼型感应电动机（调压电动机），或采用绕线转子感应电动机（转子回路可串接电阻或频敏变阻器）。转子回路电阻的加大，使恒转矩负载下也可得到较宽的调速范围，但由于感应电动机的机械特性太软，不能满足静差率（见电动机调速）的要求，要采用速度负反馈的闭环控制系统，以得到平滑且广范围的调速。



感应电动机调压调速特性曲线

交流调压调速是靠加大转子上的损耗来实现的，是耗能式调速方式。当负载是风机、泵类时，转速降低的同时负载也变小，对减轻电动机发热有利，同时，又有较宽的调速范围，因而这种调速对风机、泵类等转矩与转速呈二次方关系的负载比较合适。对于恒转矩类负载最好采用变极调压（改变极对数同时进行调压）调速。

交流调压调速系统可以由自耦变压器或饱和电抗器控制，也可由晶闸管控制。由于变压器或电抗器比较笨重，损耗也大，且不便于自动调节和动态响应慢（0.1s 以上），已被晶闸管交流调压器所代替。晶闸管交流调压器的典型主电路列于表中（表中基本电路只画了定子回路），其中前三种电路属对称调压电路，后三种属不对称调压电路。为了实现可逆运转，可以利用电磁接触器控制正反转，虽然装置简单，但属于有触点切换，快速性及可靠性较差，只适用于不频繁正反转的中小容量电动机。如果采用两组晶闸管元件接成逆相序，实现无触点切换，则可应用于要求频繁正反转及快速制动的系统。晶闸管交流调压电路具有结构紧凑、轻便、成本较低、动态响应较快等优点，在中、小容量，且对性能指标要求不十分高的场合，如低速电梯、起重机械、风机、泵类等负载，得到了较广泛的应用，也可用作无电流冲击的感应电动机的软起动器（见交流电动机起动）。

晶闸管交流调压器的典型主电路

基本电路	A B C	N A B C	A B C	A B C	A B C	A B C
晶闸管电压负荷	可达 $1.2U_{l,max}$	可达 $1.2U_{ph,max}$	可达 $1.2U_{l,max}$	可达 $1.2U_{l,max}$	可达 $1.2U_{l,max}$	可达 $1.2U_{l,max}$
特点与应用	负载可以接成星形或三角形。输出电压谐波分量与线电流的谐波分量小。 适用于对电流波形要求较高及可逆运转的场合	谐波电流较大。 因负载带中线，故大容量设备中不宜采用	有逆序转矩分量，效率较低，但线路简单，成本低，且电流波形好。 适用于小容量系统	各相电流不平衡，容易局部过热，电流波形比较差，输出转矩低。 线路简单，适用于小容量可逆系统	各相电流不平衡严重。即使不触发晶闸管也会产生单相转矩，因此不能控制低转矩。 线路最简单，适用于不可逆小容量系统	有偶次谐波，效率较低。 线路简单，成本低。 适用于能分成单相接线的电动机

注：1.2 为安全系数；$U_{l,max}$ 为线电压最大值；$U_{ph,max}$ 为相电压最大值。

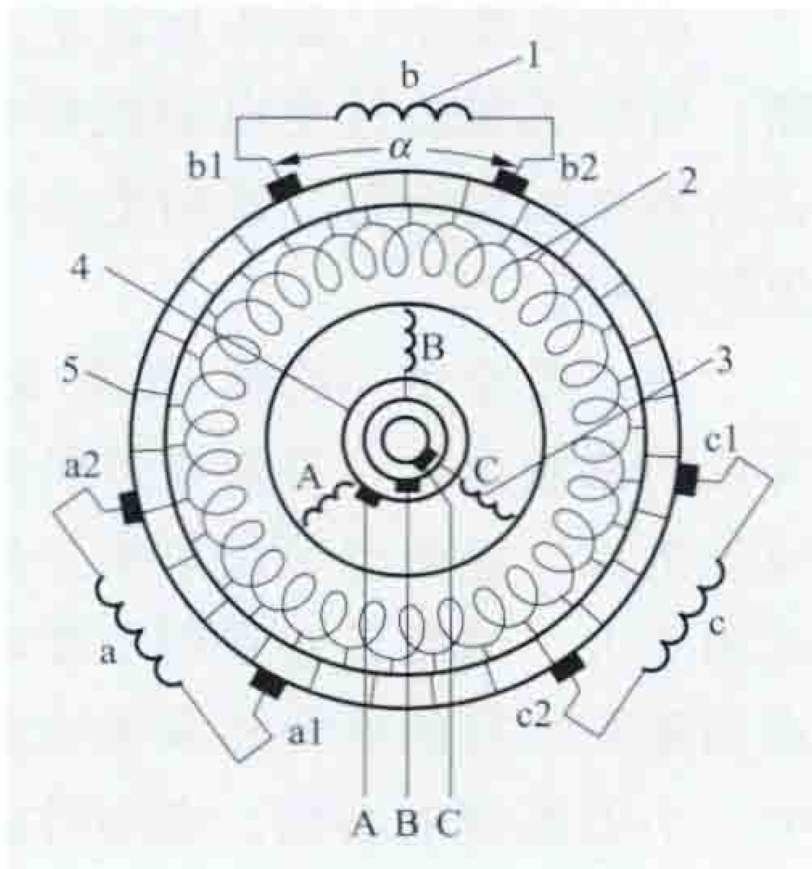
jiaoliu zhengliuzi diandongji

交流整流子电动机 (alternating current rectifier motor)

经换向器向电枢绕组供电的交流电动机，又称交流换向器电动机（alternating current commutator motor）。交流整流子电动机有三相和单相两类，每一类又分很多种，但它们的工作原理基本相同，实际中主要应用的为三相并励换向器电动机和单相交流换向器电动机中的推斥电动机。

三相并励换向器电动机　又称施拉盖电动机。这种电动机可运行在同步转速以上，也可运行在同步转速以下。其调速范围较宽，最高转速和最低转速之比可达 10∶1。它还可以改善功率因数，所以在纺织、印染、造纸等工业中应用较多。其主要缺点是：①全部电能从集电环引入，因此电压不能太高，一般不超过 500V；②换向困难，容量受到限制。

三相并励换向器电动机的原理如图所示。在转子上有两套绕组。一套是通过集电环、电刷与三相交流电源相连的一次绕组，作为一次侧，它可以接成三角形或星形；另一套是接至换向器的调节绕组，它通过电刷 a1-a2、b1-b2、c1-c2 与在定子上分开的定子绕组 a、b、c 分别串联成闭合回路，构成二次侧。



三相并励换向器电动机原理图

1—定子三相绕组；2—调节绕组；3—一次绕组；4—集电环；5—换向器

一次绕组通入三相交流电，在气隙内产生旋转磁场，它相对转子以同步转速 n_1 旋转，转子本身以转速 n 反向旋转，则磁场相对于定子绕组和换向器上的电刷的转速为转差转速（n_1-n），从而在定子绕组中感应的电动势的频率为转差频率。这样，就将调节绕组的电网频率交流电动势，经换向器和电刷的变频作用，输出与定子绕组中电动势频率相同的转差频率电动势，满足了外加电动势必须与定子电动势频率相同才能调速的条件。

调速是依靠调节电刷 a1-a2、b1-b2 和 c1-c2 的张开角 α 来实现的。调节功率因数是依靠同时移动三对电刷对三个定子绕组的相对位置来实现的。如果将 α 调到零，即二次侧外加电动势等于零，此时便是一般三相感应电动机。当调 α 为非零的某一角度时，则在二次侧加入了附加电动势，如果附加电动势与定子电动势同相位，则转速升高，如果反相位，则转速下降。为了提高功率因数，在高于同步转速和低于同步转速运行时，在圆周上移动电刷的方向应该相反。

推斥电动机　一种单相交流换向器电动机。定子上具有连接单相电源的一次绕组，转子上具有接到换向器的二次绕组，换向器上的电刷被短接，并可沿换向器圆周表面改变电刷位置。通过这一位置的改变，可以改变电动机的转向、转速和机械特性。因为电动机转向与电刷移动方向相反，故有推斥电动机之名。它与串励直流电动机的机械特性相似，用于驱动重载起动的机械负载，适于单相供电并要求调速和改变转向的场合。

推斥电动机还有其他结构：转子上具有两套电刷，其中一套固定而另一套可以移动的双套电刷推斥电动机，又叫戴利电动机（Deri motor）；定子上的一次绕组通过换向器上的第二套电刷与转子绕组串联，以改善功率因数和换向的补偿式推斥电动机；转子上具有附加笼型绕组的推斥感应电动机等。

jiaoliu-zhiliu-jiaoliu dianliuxing bianpin tiaosu

交流-直流-交流电流型变频调速 (variable frequency AC motor speed control by AC-DC-AC current source converter)　采用交流-直流-交流电流型变频器实现交流电动机调速的技术。交流电动机的极对数一定时，其同步转速与供电电源频率成正比，改变频率就能调节交流电动机的速度（见变频调速）。交流-直流-交流电流型变频器将恒压、恒频的交流电首先整流为电流源性质的直流电，然后逆变为变压、变频的交流电，供电给交流电动机进行调速。交流-直流-交流电流型变频调速系统如图 1 所示，变频器包括整流器、中间电感为主的滤波电路和逆变器，控制系统包括速度给定、输入限制、电压控制和频率控制。

交流-直流-交流电流型变频器　交流-直流-交流电流型变频器中间直流回路经大电感滤波后，形成高阻抗内阻性质的电流源。中间直流回路的电流方向不随工作状态而改变，借助电源侧和电动机侧两套全控变流器，实现四象限运行。由于电感的作用，使直流电流平直，逆变器输出给电动机的电流为方波。输出电压的波形随负载性质的不同而不同。对纯电阻性负载，显然也是方波；对感应电动机负载，电压波形则近似为正弦波。交流-直流-交流电流型变频器主要是根据其换流方式来分类，常用的有串联二极管电流型变频器和带辅助换流晶闸管的电流型变频器。串联二极管电流型变频器是利用换流电容器的充电作用以及二极管在不同时刻处于截止或导通的状态而换流；带辅助换流晶闸管的电流型变频器则是利用辅助晶闸管通断和换流电容器充放电完成换流。在换流过程中，电动机漏感要释放能量，使输出的正弦电压上叠加一个幅值较高的尖峰电压。如在逆变器输出端设置一过电压吸收环节，则可以吸收此尖峰电压，或利用大功率晶体管同时换流的逆变电路，也可减小尖峰电压。

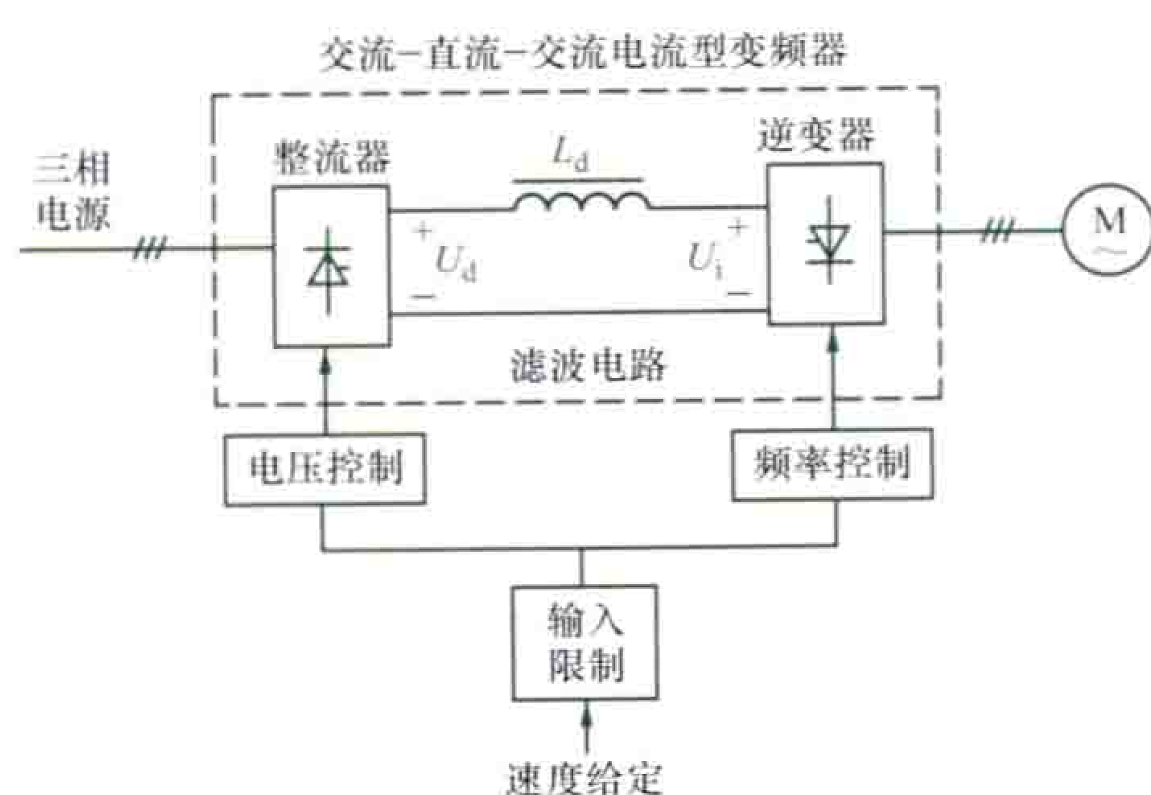


图 1　交流-直流-交流电流型变频调速系统

除上述相控整流器、中间直流环节、逆变器构成的整流直流电压可调的电流型变频器外，还有不控整流器、滤波环节、斩波器、电感储能环节及逆变器构成的中间直流电压可调的电流型变频器，由不控整流器、中间直流环节、幅值控制逆变器构成的电流型变频器，它们的区别在于电压控制的所在环节不同。

为了减少变频器输出的谐波电流及逆变器的换流容量，可采用多重化技术，即把多台普通的电流型变频器按某种方式并联，使各变频器输出的矩形波电流互相错开一定的电角度，输出电流为各矩形波电流叠加后的电流，即变成接近于正弦波的阶梯波形电流。

控制系统　交流-直流-交流电流型变频调速的典型控制系统，是比较简单的频率开环控制系统，如图 2 所示。电压和频率的基准信号，可由速度给定限位器设定。速度给定信号做阶跃变化时，为了能控制逆变器的输出电压和频率按一定的变化率改变，采用了给定积分器，将时间阶跃的输入变成斜坡函数的输出。其后分电压控制部分和频率控制部分两部分。电压控制部分的函数关系，使工频以下运行时近似地按电压频率比恒定进行调压，低频时有电压补偿。设置了有电压反馈环节的电压闭环控制，由电压调节器按给定值严格控制输出电压，电压调节器输出与电流反馈量比较送入电流调节器，形成电流闭环控制。通过调节整流器输出直流电压，使逆变器输出电流不变，具有恒流源特性。由于逆变器输出电流为可变频率的电流，电流检测在整流器输入端进行。当加上瞬态校正环节后，可以保证动态过程中保持恒电压频率比运行，改善了系统的稳定性。频率控制部分的U/f变换器是一种模数转换器，将电压信号变为频率信号（时钟脉冲信号）；脉冲分配器将输入的时钟脉冲信号变换为周期性的循环脉冲信号，然后经过放大去控制逆变器晶闸管。由于时钟脉冲频率与速度给定值成正比，改变速度给定值即可调节逆变器的输出频率，从而调节交流电动机的速度。

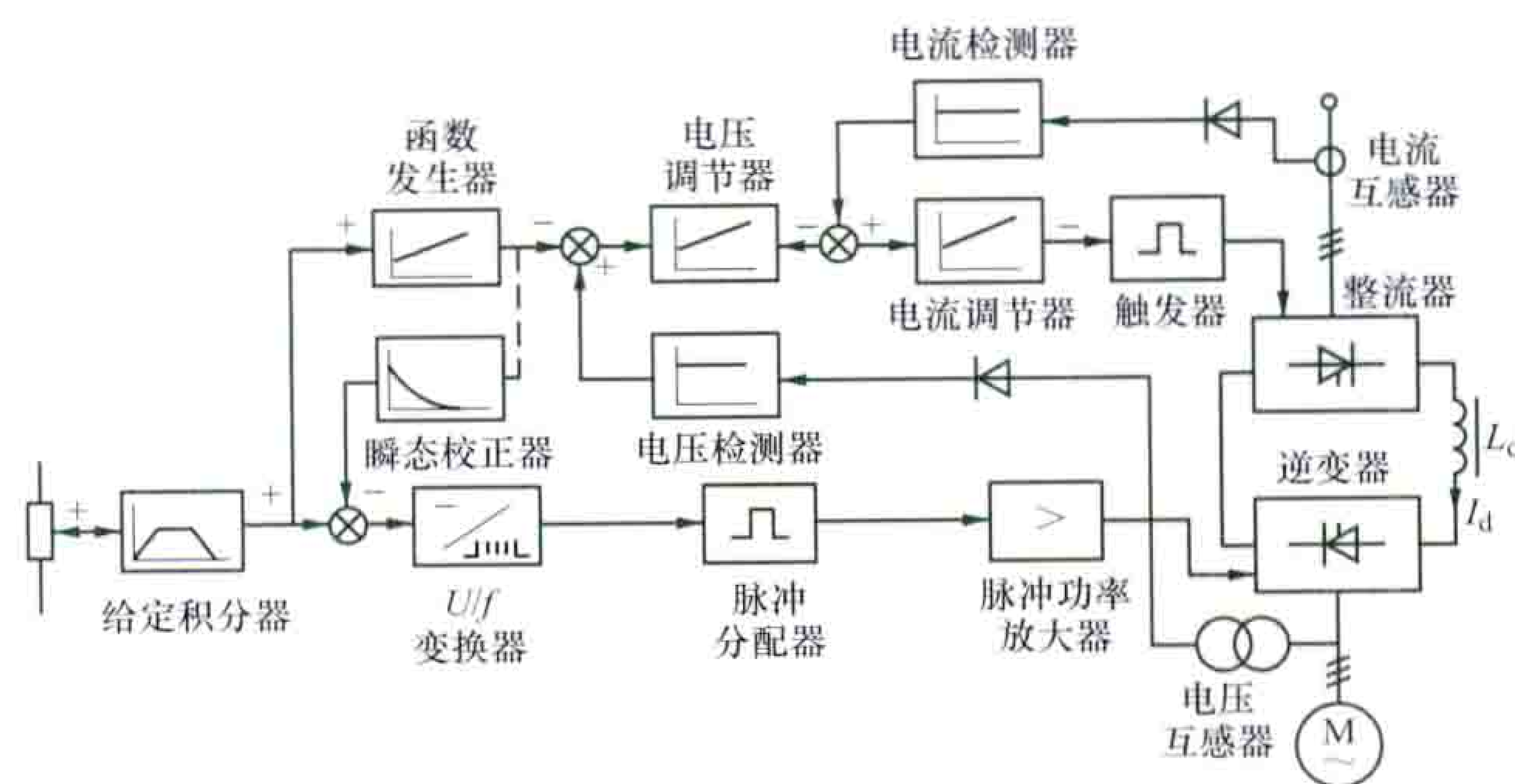


图 2　频率开环控制系统（U/f=常数）

采用这种简单的控制系统可以实现再生制动和能耗制动。再生制动时，可减小给定值，由于机械惯性，电动机的转速下降得比较慢，使电动机的转速高于同步转速，转子绕组与气隙磁通相对运动的方向改变了，从而使电动机进入再生制动状态。这时，逆变器的工作状态变为整流状态，可控整流器进入逆变状态，中间环节直流电压极性反向，电流方向保持不变。能耗制动时，断开电动机交流电源，定子任意两相通入直流电流，在气隙中建立一个固定不动的磁场，转子因惯性而继续转动，其绕组与固定磁场之间有相对运动并产生电流，该电流与气隙磁场相互作用，建立制动转矩。

控制系统中，如果加设正、反转检测和正、反转切换电路，可以无触点改变电动机转向，从而实现正向电动运行、正向再生制动运行、反向电动运行、反向再生制动运行等四象限运行。

特点及应用　交流-直流-交流电流型变频调速能方便地实现四象限运行；当逆变器换流失败或负载短路时，可限制故障电流；但由于采用频率开环控制，调速精度不高，调速范围不大。因此，它多用于要求频繁但不急剧加、减速或要求四象限运行的单台感应电动机，也可用于特性相同的多台中、小型感应电动机。应用时应注意，当负载发生急剧大幅度变化时，可能使电动机进入不稳定区而造成停转。它还可作为起动器，用于功率大而频繁起动的笼型感应电动机。同步电动机用交流-直流-交流电流型变频调速运行时，在电动机负载变动的情况下，为了使逆变器输出电压相位不会因此而改变，可检测输出电压的相位，通过锁相环控制，使之成为电压源特性。在实际中常用这种控制方式使多台同步电动机同步运行。同步电动机通过励磁调节可以在超前功率因数下运行，从而可以利用电动机反电动势换流，但在 10% 额定转速以下时，反电动势较小而无换流能力，必须采取简单的强迫换流措施。对于调速精度和范围要求高的交流电动机调速系统，应采用其他控制方式，如矢量控制（见交流电动机矢量控制）。

jiaoliu-zhiliu-jiaoliu dianyaxing bianpin tiaosu

交流-直流-交流电压型变频调速 (variable frequency AC motor speed control by AC-DC-AC voltage source converter) 采用交流-直流-交流电压型变频器实现交流电动机调速的技术。交流电动机的极对数一定时，其同步转速与供电电源频率成正比，改变频率就能调节交流电动机的转速（见变频调速）。交流-直流-交流电压型变频器将恒压、恒频的交流电首先整流为具有电压源性质的直流，然后逆变为变压、变频的交流电源，供电给交流电动机进行调速。传统的交流-直流-交流电压型变频器是指由晶闸管构成的电力电子变流器。采用全控开关器件构成的交流-直流-交流电压型脉宽调制变频器也在交流变频调速中得到了广泛应用（见交流脉宽调制变频调速）。

交流-直流-交流电压型变频调速系统如图1所示，变频器包括整流器、中间电容为主的滤波电路和逆变器，控制系统包括速度给定、输入限制、电压控制和频率控制。

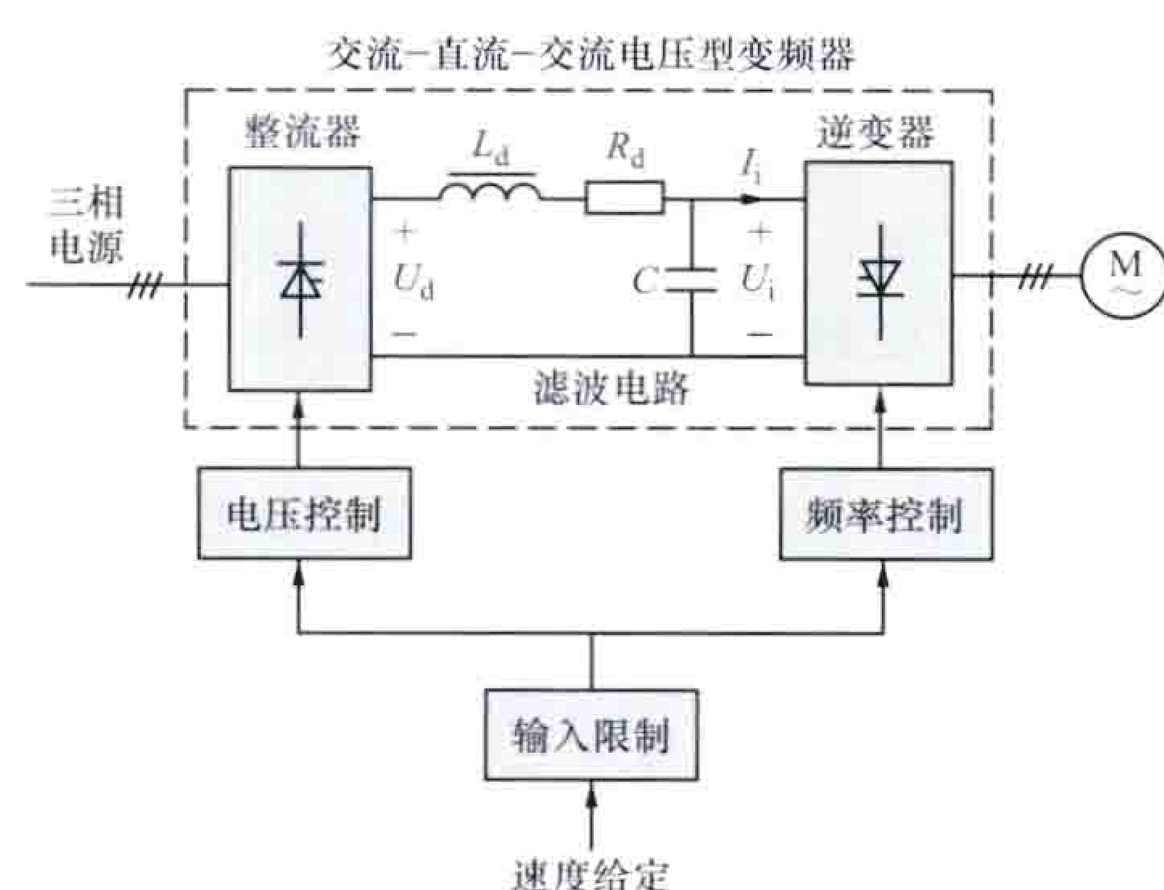


图1 交流-直流-交流电压型变频调速系统

交流-直流-交流电压型变频器 交流-直流-交流电压型变频器中间直流回路里滤波电容的电容量很大，为直流侧储能环节，由于电容的作用，直流输出电阻很小。因此，电动机的端电压波形为方波。这个电压加在感应电动机定子端，使其电流只是近似正弦波。交流-直流-交流电压型变频器，主要是根据其换流方式来分类，常用的有串联电感式电压型变频器和带辅助晶闸管换流的电压型变频器两种。①串联电感式电压型变频器电路中，当某臂的晶闸管触发导通时，在电感的作用下，使该相另一臂的晶闸管承受反向电压而关断。负载越重时，换流越困难，不适于负载变化剧烈的场合，同时当频率下降到1/3～1/4工频以下时，换流电容储能不足，故不适于低频工作，使调速范围变窄。②带辅助晶闸管换流的电压型变频器电路中，主晶闸管的关断是靠触发辅助晶闸管来实现的。换流电容上的电压会随负载加大而提高，使换流能力受负载变化的影响较小，与串联电感式电压型变频器比较，其换流损耗要少，效率较高，更适于较高频率和较大容量的情况，其应用较多。

除上述由相控整流器、中间直流环节和逆变器构成的整流直流电压可调的电压型变频器外，还有由不控整流器、滤波环节、直流斩波器、储能环节和逆变器构成的中间直流电压可调的电压型变频器，由不控整流器、中间直流环节和脉宽调制逆变器构成的不控整流、电压型脉宽调制变频器（见交流脉宽调制变频调速），它们的区别在于电压调节所在的环节不同。

如果使用可关断晶闸管，由于其具有良好的可断性和快速性，利用它作为逆变器开关时，使变频器主电路大为简化，省去了复杂的换流电路，降低了故障率，运行可靠性大为提高。

为了改善交流-直流-交流电压型变频器交流输出的波形，使电动机在低速范围内也能平滑运行，同时又减少损耗，提高效率，可采用多重化技术。对高压大容量的电动机，在负载转动惯量大、谐振倍率高、容易出现轴共振及过电压的情况下应用时，通常采用错开逆变器相位的三相桥多重连接。

控制系统 交流-直流-交流电压型变频调速的一种典型控制系统，是比较简单的电压闭环、频率开环的控制系统，如图2所示。整流器为三相全控桥，逆变器采用辅助晶闸管换流的变频器。控制系统包括整流器的电压控制部分和逆变器的频率控制部分。电压和频率的改变来自同一个给定信号，即速度给定信号。为了在速度给定信号即使做阶跃变化的情况下，也能控制逆变器的输出电压和频率按一定的变化率改变，采用了给定积分器，将时间阶跃的输入变成斜坡函数的输出。其后分电压控制部分和频率控制部分两路。电压控制部分函数发生器的函数关系是使电动机在工频以下运行时近似地按电压频率比恒定进行调压，低频时有电压补偿措施；电压调节器的限幅值可在工频以上保证电压恒定，实现近似恒功率调速；电压控制环节是最简单的带电压负反馈的移相控制系统。频率控制部分的U/f变换器是一种模数转换器，将电压信号变为频率信号（时钟脉冲信号）；环形分配器是将输入的时钟脉冲信号变换为周期性的循环脉冲信号，其输出分别控制逆变器主晶闸管和辅助晶闸管。当升高或降低电动机转速时，可加大或减小速度给定值，控制系统将按照给定值和相应的U/f关系调节变频器的输出电压和频率，增大或减小电动机的转矩，使电动机加速或减速，并稳定在要求的速度下运行。根据调速的需要，可以加入由速度检测、速度比较和速度调节等构成的速度反馈环节，形成速度闭环系统。

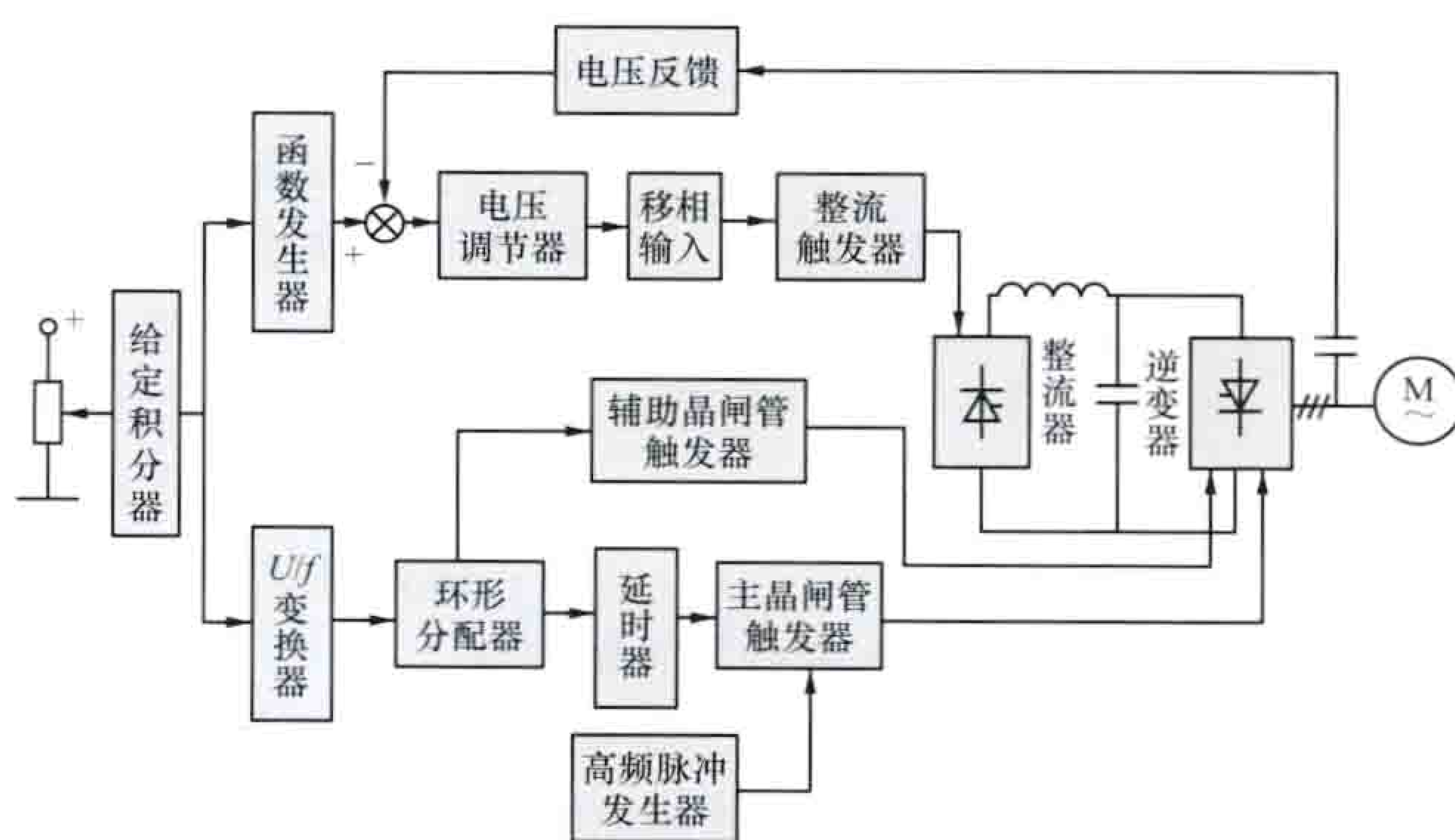


图2 交流-直流-交流电压型变频调速控制系统

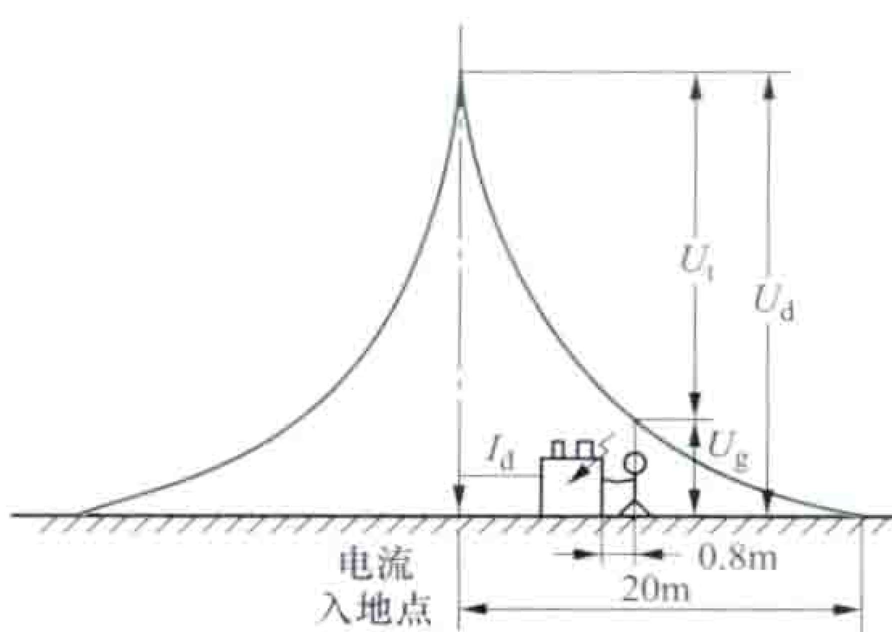
特点及应用 交流-直流-交流电压型变频调速多用于不要求四象限运行的场合。一方面，可省去整流侧的反并联晶闸管三相桥，从而简化了系统；另一方面，电动机制动时消耗的能量也不太大。如果要求四象限快速可逆运行，最好采用电流型变频调速。此外，电压源逆变器内阻抗小，输出电压比较稳定，适宜于同时为多个负载供电，如多机拖动系统，此时负载间的影响较小。如果应用于风机、水泵类负载，可将电压按正常的U/f比降低控制，从而提高感应电

动机的效率，达到节能目的。在应用中，应当注意开环控制下的感应电动机运行在低频（25Hz左右）时，由于电动机的转子动能与滤波电感、电容之间发生能量交换，可能出现不稳定现象。一般来说，转动惯量愈大，滤波环节电阻、电容愈大，电动机转子电阻愈大，整流器换流电抗愈大，调速系统运行趋于稳定。也可用电动机电压或直流环节电流微分反馈或转矩分量反馈电路来阻尼振荡，以提高运行的稳定度。

交流-直流-交流电压型变频调速可以用于感应电动机，也可以用于同步电动机。电压源逆变器-同步电动机调速系统只是增加了一个励磁电流调节回路。如纺织机上的数十个计量泵，每个泵由一台永磁同步电动机拖动，要求数十台电动机严格同步运行，则可采用交流-直流-交流电压型变频调速，实行多机协调控制。同步电动机低频运行时和开环控制运行时都会出现不稳定问题。电动机电枢漏抗的加大，励磁电流的减小，d、q轴电抗差别的减小，电枢电阻的减小，转子转动惯量的加大，都会使运行愈趋于稳定。因此，也应注意参数的配合和采用闭环控制以提高稳定度。

jiechu dianya

接触电压 （touch voltage） 当电气设备发生单相绝缘损坏时，人手接触电气设备处与站立点间的电位差。电气设备或架构的外壳一般都与接地装置连接，当电气设备单相绝缘损坏时，将有接地电流（I_d）流过接地装置，在大地表面上形成以电流入地点为中心的双曲线形状的分布电位。这时人手接触电气设备处的对地电位即为设备外壳的对地电压 U_d，人脚站立处的对地电位即为电压 U_g，两者之差为接触电压 $U_t=U_d-U_g$，如图所示。接触电压通常取地面到设备水平距离为0.8m处与设备外壳离地面垂直距离为1.8m处两点之间的电位差。接触电压主要产生于接地短路电流，也可能来自雷电流。接触电压值可通过计算或实测得到，其数值不应超过规定的安全电压。当人体站在距电流入地点20m以外，与带电设备外壳接触时，接触电压达到最大值。接触电压造成的人体触电属间接触电。



接触电压示意图

降低接触电压的措施有：①在架构设备外壳周围约1m的地中，埋设20～30cm的辅助接地线，并与主接地线相连接；②铺沙砾或浇混凝土或敷沥青地面以提高地表面电阻；③敷设水平均压带。

jiechuqi

接触器 （contactor） 用于远距离，频繁地接通和分断交、直流主电路和大容量控制电路的非手动开关电器（见低压电器）。其主要的控制对象为电动机，也可用作控制电热设备、电气照明、电焊机和电容器组等电力负载。接触器具有较高的操作频率和工作寿命。在许多使用场合，为了降低交流电磁接触器电磁机构的功率损耗和减少电磁机构吸合时的噪声，推广交流电磁接触器的无声和节电运行。图1所示为各种类型的接触器。



图1 接触器

技术参数 包括额定工作电压、额定工作电流或额定工作功率（指负载功率）、额定工作制、使用类别（用以区分使用负载性质，如电阻性负载、滑环电动机、笼型电动机以及直流并励或串励电动机、电容器组等负载）、额定接通与分断能力、电寿命与机械寿命、操作频率等。

分类 ①按主电路电流性质可将接触器分为直流接触器、交流接触器。有的接触器既可用于直流电路也可用于交流电路，称为交直流接触器。②按级数可将接触器分为单极、二极、三极和多极等。直流接触器仅有单极和二极的，交流接触器多为三极的。③按灭弧介质可将接触器分为空气式、油浸式和真空式。空气接触器的触头置于大气环境中，以空气作为灭弧介质；油浸接触器的触头置于绝缘油中，以油作为灭弧介质；真空接触器的触头置于真空灭弧室中，以真空作为绝缘介质。一般空气接触器和油浸接触器装有隔弧板或灭弧室，用以熄灭触头在通断电流时产生的电弧，而真空接触器触头间的电弧在密封的真空灭弧室中熄灭，因而真空接触器可直接用于有易燃、易爆、粉尘或气体等场所，如煤矿井下和化工厂等。④按驱动机构可将接触器分为电磁式、液压式和气动式。电磁接触器是用交流或直流电磁机构驱动的，电磁机构由铁芯和线圈组成，线圈通电时，电磁铁产生电磁吸力，衔铁吸合带动触头支架使触头动作。这种形式的接触器使用最为普遍，如图2所示。液压接触器通常用油通过液压机构来驱动触头动作。气动接触器用压缩空气作驱动源。⑤按有无触头可将接触器分为有触头接触器、无触头接触器和混合式接触器（见无触点开关）。

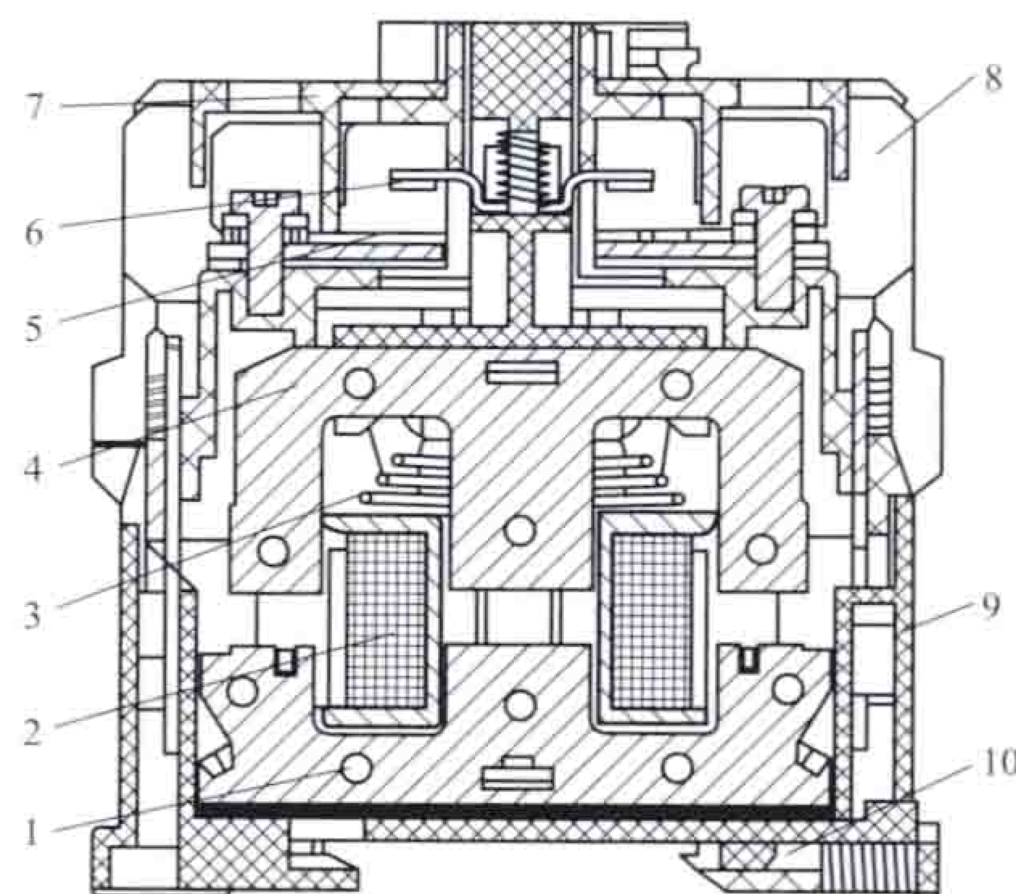


图2 直动式交流电磁接触器结构
1—铁芯；2—线圈；3—反力弹簧；4—衔铁；5—静触头；6—桥形动触头；7—灭弧室；8—躯壳；9—底座；10—滑块（卡轨用）

交流电磁接触器无声和节电运行 按工作原理一般可分为：①脉动直流吸持运行。当交流电磁机构的衔铁吸合后，将线圈的交流供电改为直流供电，因衔铁吸合后保持一定的电磁吸力所需的励磁电流很小，故改为直流后可大大降低功率损耗，并消除了因交变电流引起铁

芯振动而产生的噪声。交流电磁接触器脉动直流吸持运行后，线圈消耗的功率只有原来的20%～30%，节能较显著，但操作频率较高时，节能效果不大。②机械锁扣运行。当衔铁吸合后，可用附加的锁扣机构将触头系统机械地扣住，使其保持在闭合位置，操作线圈可以断电。要断开接触器时，需将脱扣电磁铁通电，让锁扣机构脱扣。这种接触器在保持吸合位置时，线圈不耗电，也无噪声。③剩磁吸持运行。把铁芯换成剩磁大的电磁材料，完全靠剩磁维持吸持运行状态。线圈不耗电，也无噪声。④永磁吸持运行。安装在接触器联动机构上极性固定不变的永磁铁，与固化在接触器底座上的可变极性软磁铁相互作用，从而达到吸合、保持与释放的目的。这种接触器在保持吸合位置时，线圈不耗电，也无噪声。

jiedi zhuangzhi

接地装置 (earth-termination system)　由接地连接线和接地体构成的总和。为了防止电气设备绝缘损坏而带电危及人身安全，需将电气设备外壳通过金属导线与接地装置连接。将电气设备可能产生的短路电流、剩余电流、静电荷及雷电流引入大地，从而避免人体触电等事故的发生。

接地装置包括接地体和接地线。其电阻由接地体电阻、接地线电阻及土壤电阻构成。由于土壤电阻系数比较固定，接地线的电阻较小，所以选用良好的接地体是决定接地装置电阻的关键。

接地体　一根或一组与大地土壤密切接触并提供与大地之间电气连接的导体。接地体分为自然接地体和人工接地体。

(1) 自然接地体。不是专门为接地设置的有效接地连接体。直接埋入地下或水中的可用作接地装置的金属管道、金属结构及钢筋混凝土基础等都可作为自然接地体。自然接地体分布面广，并联后的电阻有时可能极小，且利用起来经济方便，所以拟优先选用自然接地体作为接地体。

(2) 人工接地体。当自然接地体的接地电阻值不能满足规程规定的接地电阻值时，人为埋入地下用作接地装置的导体，如水平接地电极、垂直接地电极和放射形接地体等。由于钢管机械强度高，容易垂直打入地下，一般情况下可选用直径50mm、长度2.5m的钢管作为人工接地体。接地体顶部距地面500～700mm，以减小外界温度、湿度变化对其阻值的影响。在有强烈腐蚀性土壤中敷设人工接地体时，最好使用经防腐处理的钢材。

单根接地体的接地电阻与型钢品种、接地体总长、埋深、尺寸、埋置方法等有关。为了实现规程规定的预期电阻值，需采取多根接地体并联，这时，单根接地体间可以用扁钢连接。接地体间的距离，一般取为单根接地体的长度，以减小电磁屏蔽作用。

接地线　电气设备与接地体间连接的导体。接地线也分为自然接地线和人工接地线。

(1) 自然接地线。建筑物的金属结构，如梁、柱、桁架等，生产用的金属结构，如吊车轨道、配电装置外壳、金属走廊及平台、电梯竖井、起重机及升降机的构架、布线用钢管、电缆外皮等，都可以作为自然接地线。在设计中为了节约金属，减少施工费用，也应尽量采用自然导体作为接地线，但应将其连接牢固，严防锈蚀折断，对局部连接不可靠处应加型钢并联补强。接地线与自然接地体的连接采用焊接、螺钉连接或抱箍螺钉连接，并应考虑防松、防腐措施。

(2) 人工接地线。只有当自然接地线在运行中电气连续性不可靠或有发生危险的可能，以及阻抗较大，不能满足接地要求时，才考虑采用人工接地线。在选用人工接地线时，除了其电阻值要达到设计要求外，还应检验通过故障电流时的热稳定及机械强度。

jiedian

接电 (connection of power supply)　供电企业将用户的受电装置接入供电网的行为。接电后，用户合上自己的开关，即可开始用电，这是办理业扩报装的最后一道工序。一般安装电能计量装置与接电同时进行，故又称装表接电。接电后，业扩报装（见业扩报装管理）工作结束，供用电关系确立。

实施接电前应具备以下条件：①新建的外部供电工程已验收合格；②用户受（送）电装置已竣工检验合格；③高可靠性供电费用已结清；④供用电合同及有关协议均已签订；⑤电能计量装置已检验安装合格；⑥用户电气工作人员考试合格并取得证件；⑦用户安全运行规章制度已经建立。

jiehuxian

接户线 (service mains)　从配电线路上接至供电企业与用户配电系统责任分界点间的一段线路。接户线的导体截面应满足负荷最大时的导线安全载流量要求。接户线的对地高度与安全间距均应符合规定。接户线一般归供电企业负责运行维护。

在中国，供电企业与用户的责任分界点通常按照以下规则界定：①低压用户。由低压架空配电线路供电的用户，责任分界点为用户墙外第一支持物，如墙装横担等；由低压电缆配电线路供电的用户，责任分界点在电缆终端头的尾线与用户用电设备（如熔断器、低压开关等）连接处。②高压用户。由高压架空配电线路供电的用户，若用户设备为户内装置，责任分界点为用户变电所外墙穿墙套管，其墙外穿墙套管螺栓的紧固工作由用户负责；若用户设备为户外装置，责任分界点在用户第一高压设备连接处，其挂线支架属用户设备，高压引线与第一高压设备连接处的螺栓紧固工作由用户负责。由高压电缆配电线路供电的用户，责任分界点在电缆终端头的尾线与用户第一高压设备连接处。

jiexian duanzi

接线端子 (terminal)　用于电器固定电连接的导电零部件。任何电气设备与元件在电路中都要与其他设备或元件相连接，用来连接一个或两个以上导体并且是不经常拆卸的连接均采用接线端子。用接线端子进行连接要求连接牢固，并应保证长期接触电阻要小，以防止连接处松动和通电后过热。用接线端子实现的连接形式有平板形导体的连接、平板形导体与圆形导体的连接、圆形与圆形导体的连接、导

线末端与电器接线端的连接等。

常见的接线端子有螺钉型、接线头（线鼻子）式、柱式、瓦形垫式、非螺钉型5种（如图1所示），以及二次配线使用的端子排和电器安全接地用接地端子。

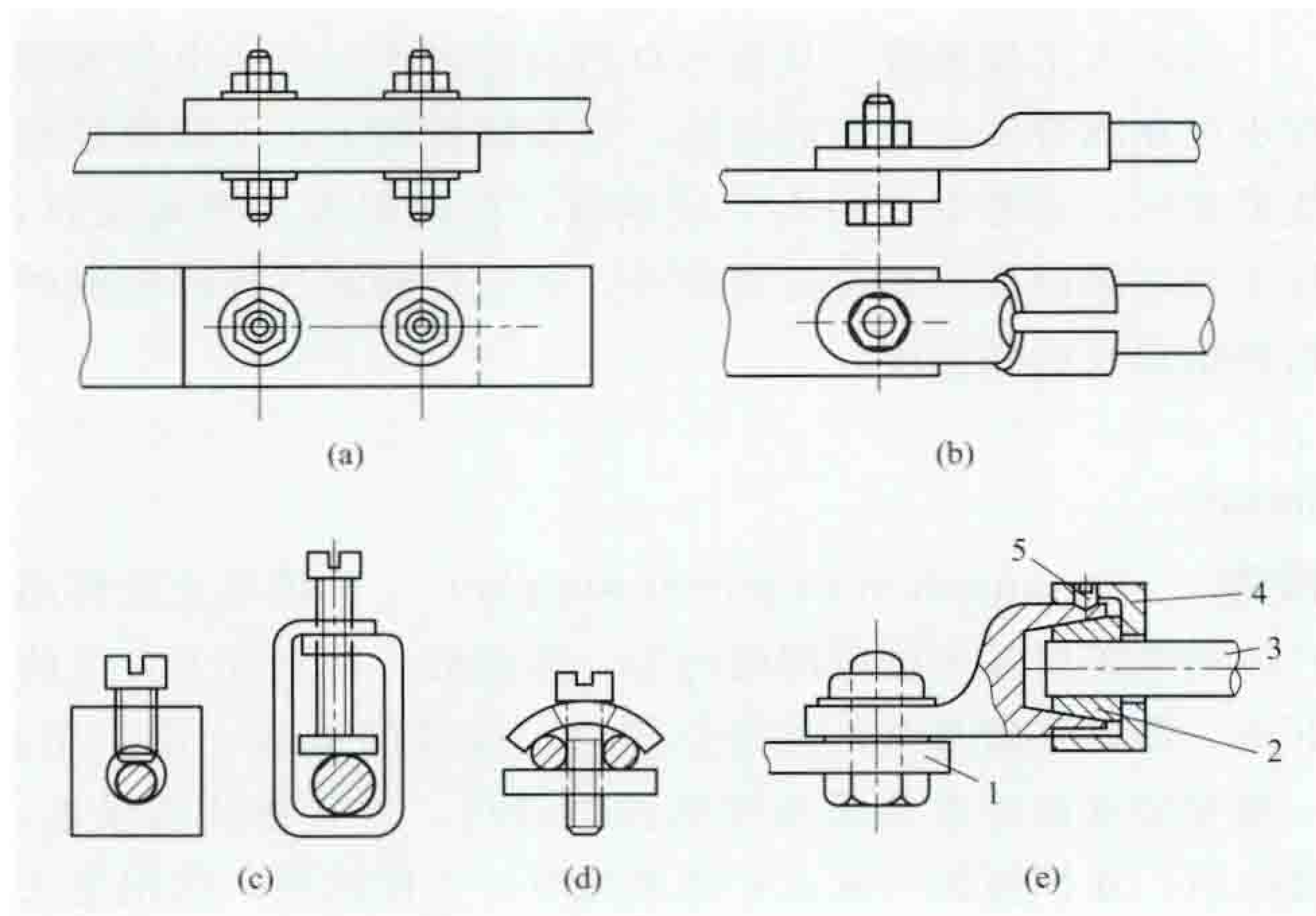


图1 接线端子示意图

（a）螺钉型接线端子；（b）接线头式接线端子；（c）柱式接线端子；（d）瓦形垫式接线端子；（e）非螺钉型接线端子

1—矩形母线；2—楔形套管；3—圆形导体；4—金属套盖；5—止动螺钉

（1）螺钉型接线端子。如对矩形母线的连接，应根据母线尺寸的大小选择适当的搭连面积、螺钉数量和压力，以保证母线间有较小的接触电阻。

（2）接线头（线鼻子）式接线端子。通过螺钉、螺母紧固的母排或电缆头的接线端子。

（3）柱式接线端子。导体插入孔内或型腔内，用螺钉下端或通过垫圈、夹紧板压紧。

（4）瓦形垫式接线端子。导线插入瓦形垫下端的一侧或两侧，通过螺钉下拧而压紧。

（5）非螺钉型接线端子。其连接可直接或间接地通过弹簧、楔形块、偏心轮或锥形轮来完成。图1（e）所示为一种采用楔形套管连接的非螺钉型接线端子。带内螺纹的金属套盖拧紧时通过楔形套管压紧圆形导体，最后用止动螺钉锁紧。

（6）端子排。开关柜中二次配线用的端子排是常见的一种接线端子，其数量和长短可任意组合。开关柜中使用端子排来连接控制线路的主要目的是便于安装、查对和检修线路，以及连接柜内与柜外电路。主要有栅栏式端子排、插拔式端子排、弹簧式端子排、轨道式端子排等，如图2所示。

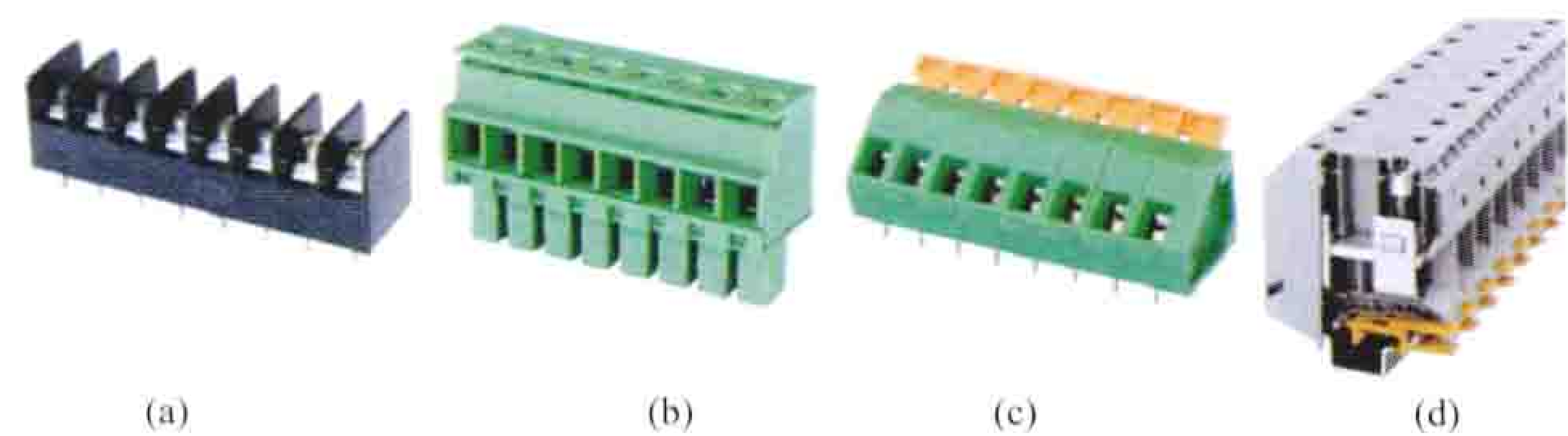


图2 端子排外形

（a）栅栏式端子排；（b）插拔式端子排；（c）弹簧式端子排；（d）轨道式端子排

（7）接地端子。用特定连接保证电器的一部分接地用的接线端子。它有明显的标志，其螺钉尺寸等符合安全要求，安装位置方便。

jiedianliang

节电量　（amount of electricity saving）　以统计期内电能实际消耗量与某一基准量相比而减少的数量。节电量分为宏观节电量和微观节电量。

宏观节电量　整体国民经济的节电量。它是考核主管部门或地区节电工作的主要指标，不仅包括微观节电量，也包括因经济结构调整、产品用能结构变化以及原材料节约、产品加工深度提高、产品质量改善、劳动生产率提高、综合利用等间接因素所节约的电量。宏观节电量用于制订长期节电规划和确定长期电能供需平衡的预测，以及规划目标与年度计划的相互衔接，从宏观经济角度来研究电能利用的经济效果。

微观节电量　企业的直接节电量。它是企业通过加强用电的科学管理，改进工艺，改造设备，采用新技术、新工艺、新材料等，减少电能损失，降低单位产品（产值）耗电，提高电能利用率，从而直接减少的用电量。微观节电量用于评价企业合理用电工作成绩的优劣以及研究企业节电潜力和相应的开发措施，以保证企业更加经济合理地使用电能。微观节电量分为产品节电量、产值节电量、技术措施节电量和其他节电量。

（1）产品节电量。降低单位产品耗电而减少的用电量。它反映企业在生产经营活动中采用节电措施的综合节电效果。由于单位产品耗电统计计算口径的一致性，使得产品节电量在不同地区相同类型企业之间具有一定的可比性。

（2）产值节电量。降低单位产值耗电而减少的用电量。单位产值耗电是以货币单位（如万元）形式表示的。除了生产技术与管理因素外，产品结构的变化、对外协作的增减等也是影响产值电耗因素。产值节电量不如产品节电量能真正反映企业的节电效果，对于同类型企业产值节电量也缺乏可比性。但对于产品种类繁多、生产周期长、又难以按单位产品耗电计算节电量的企业（如机械企业），其产值节电量仍然是评价企业合理用电工作成绩的方法之一。

（3）技术措施节电量。通过设备更新或改造、生产工艺改革、操作方法改善等措施，使电能利用率提高、产品产量增加、生产时间缩短而减少的用电量。对企业来说，技术措施节电量应包括在产品节电量之中，若未包括在内，则应单列作为技术措施节电量统计。技术措施节电量在统计时，应避免与产品节电量重复计算。

（4）其他节电量。包括非生产用电的节电量、新产品开发和研制使产品产量和质量提高带来的节电量、基建工程施工用电的节电量、降低供电线损的节电量和自备电厂厂用电的节电量等。

jiedian xiaoyi pinggu

节电效益评估　（benefit assessment for electricity saving）　对用户实施的节电措施的投资费用和实施效果综合分析及测算的活动。在实施节电项目和投资之前进行技术上的合理性、可行性和经济效果优劣的预测和选择；项目

实施后对实施效果进行评价。用户侧的节电技术措施，会带来电力负荷需求的减少和电量的节约。因此在进行节电效益评估之前的一个重要工作是进行节电潜力评估，通过科学的评估理论、方法和模型，对推广实施电力需求侧管理所获得的节电资源潜力进行分析计算，得到可节约的用电量和高峰负荷，分别对应可避免的电量和容量成本。节电潜力包括技术潜力、经济潜力和市场潜力三个部分。①技术潜力。规划期内在技术上可行的节电资源，指使用更高效的技术便可能节约的资源量。②经济潜力。技术可行且经济合理的节电资源，是在技术潜力的基础上通过成本效益分析后判定的具有成本有效性的节电资源，在获得技术效率的同时还可获得经济效益，达到节电目的。③市场潜力。成本有效的节电资源进入市场后有望实现的节电资源，是以用户参与率为基础，靠市场运营策略的推动来发掘的资源潜力。

节电效益评估按照从事主体不同，分为电厂侧节电效益评估、电网侧节电效益评估、用户侧节电效益评估和社会侧节电效益评估四个方面，各主体的评估内容包含效益和成本两个部分，益本比法是最常用的评估方法。

节电项目的全部效益与成本的比值即为益本比，即

$$BCR = \frac{B}{C}$$

式中 BCR 为益本比；B 为节电项目效益；C 为节电项目成本，万元。

益本比大于1时，认为该节电项目在经济性方面具有可行性或实施效果合格；益本比小于1时，认为该节电项目在经济性方面不具有可行性或实施效果不合格。

节电项目的效益和成本根据评估主体不同分别选择，也可计算各评估主体的总效益和总成本。

电厂侧节电效益评估　电厂侧节电效益包括可避免容量成本（电厂侧）和可避免运行成本（电厂侧）两部分。电力负荷需求的减少可降低电力系统的高峰需求，从而降低或延缓电厂发电机组扩容需求和投资，降低电厂侧容量成本，即可避免容量成本。同时用户侧节约电能消耗可降低电厂侧运行成本，即可避免运行成本。

电网侧节电效益评估　电网侧节电效益包括可避免容量成本（电网侧）和运营成本降低（电网侧）两部分。通过节电技术措施，延缓了电网输电和配电等设施的投资，提高了输配电资产利用率，降低了电网侧容量成本，同时降低了运营成本。电网侧节电成本包括：电网企业需承担部分节电技术措施的设备和安装成本，安排人员推广专业设备和技术管理节电项目等的成本。

用户侧节电效益评估　用户侧节电效益包括减少电费支出和提高可靠性两部分。用户为了合理用电采用的节电技术措施一般需要投入一定的资金，但改造后的高效用电设备一般损耗低、电能浪费少，可以帮助用户获得电费节约；高效用电设备技术工艺更为先进，可以为用户提高供电可靠性；高效用电设备自动化控制水平更高，有助于节约用户管理成本。用户侧节电成本包括：用户需要承担部分节电技术措施的设备和安装成本，以及改进用电管理方式投入的成本。

社会侧节电效益评估　社会侧节电效益包括电厂侧和电网侧效益总和加上用户侧可靠性效益及全社会环境效益。社会侧节电成本包括用户侧和电网侧节电设备购买、安装和运行的费用。

jieyue yongdian jishu

节约用电技术　(technology for electricity saving)

节约电能的措施和方法。它贯穿在机电设备的设计制造、选型匹配、运行管理的过程中，随着对能源重要性认识的深化而逐步发展，是节能技术的重要组成部分。节约用电技术的应用，一般需要经过对原设备运行工况的测试，电能利用技术方案的预选和评估（见节电效益评估），再选择最佳方案组织实施等步骤。将节约用电技术应用于新产品的开发研制而制造出来的产品称为节电产品。

20世纪70年代初，面对爆发的世界性能源危机，世界多数国家开始了能源政策研究，能源的节约问题被列为重要课题，电能的节约和节能技术的开发普遍得到重视。节约用电技术的发展是从对旧设备的改造开始的，逐步扩大到改革生产工艺和操作方法，进一步发展到设计制造节能设备并日益重视设备（或系统）的经济运行。

根据适用对象的不同，节约用电技术可划分为设备改造与更新，生产工艺改革与操作方法改进，新技术、新工艺和新材料的应用，设备经济运行等几大类。

设备改造与更新　正在运行的设备（包括电气设备，如电动机、变压器）和生产机械（如风机、水泵）是电能的直接消耗对象，它们运行性能的优劣直接影响到电能消耗的多少。长期使用的用电设备会磨损老化，性能也会逐步变劣，对其结构或性能进行技术改造与更新是节约用电的重要工作。设备的节电技术改造与更新要与企业的技术进步结合起来，统一规划，同步组织实施，可使企业获得更大的经济效益。首先要对设备进行电能平衡测试，从中找出设备需要改造或更新的目标，经过技术经济比较后确定是改造还是更新。设备改造的具体节电技术有电动机节电技术、变压器节电技术、风机节电技术、空调节电技术等。

生产工艺改革与操作方法改进　生产工艺和操作方法是影响电能消耗的重要因素，也是影响产品产量和质量的主要因素。生产工艺的改革和操作方法的改进，必然获得劳动生产率的提高、产品质量的改善和电能消耗的降低。如电炉冶炼不锈钢，改用返回吹氧熔炼新工艺，冶炼时间可缩短1/4～1/3，不锈钢的单耗可降低20%～40%；冶炼电石避免明弧操作，不仅可以减少辐射热损失，而且可以减少石灰烧损，并使电石产量增加，可使电石单耗减少160～220 kW·h/t。

新技术、新工艺和新材料的应用　随着科学技术进步，新技术、新材料、新工艺的不断开发和应用，给能源的节约开辟了广阔的前景。电子技术的开发应用，使耗电高的电动直流发电机组和汞弧整流器被淘汰；合成氨生产采用微机控制新技术，使生产工艺参数始终保持在最佳状态，生产合成氨的单耗可降低10%；在应用耐火保温性能较好的硅酸铝纤维改造中，低温电加热炉可以降低单耗25%；利用非晶合金制成的变压器的铁损比常规变压器减少70%；合成氨生产中将常压变换改为加压变换，可使合成氨单耗下降200kW·h/t。

设备经济运行　设备实行经济运行的目的是降低电能消

耗，将运行成本降到最低。多数情况下，常按最大负荷来选配设备能力，不可避免会出现匹配不合理，设备长期处于低效运行状态而造成电能浪费。经济运行实际上是将负载变化信息反馈给调节系统来调节设备的运行工况，使设备保持在高效区工作。对于有多台设备同时为同一个系统提供服务的，可采用经济运行来降低电能的消耗。如城市的自来水供水系统中，可以通过调节水源的开泵台数和调节泵的流量来实现经济运行。经济运行也可应用于空调系统、空气压缩机站、有两台及以上变压器的变电站等。

jiezhi jiare

介质加热 (dielectric heating) 利用频率在1～300MHz范围内的高频电场的能量，对非导电（电介质）和部分导电类材料进行的*电加热*，又称电极式高频电场加热，与*微波加热*同属高频电场加热。其加热原理：放置在两极板之间的被加热材料，在高频电场的作用下，其分子和原子中的正、负电荷产生高频率的交变位移（反复极化），引起分子间的激烈摩擦，从而在内部产生热量，使材料加热。

特点及应用 热量在被加热材料内部产生，因此加热速度快、材料内外加热均匀、热效率高；但其设备投资较大、电效率低、生产费用较高，且高频电场对人体有一定危害，对广播、电视和通信有可能产生干扰，需采取必要的安全防护措施。

高频电场加热时，被加热材料单位体积所吸收的功率P（W/cm^3）的计算式为

$$P=0.56fE^2\varepsilon_r\tan\delta\times10^{-12}$$

式中f为电场频率，Hz；E为电场强度，V/cm；ε_r为被加热材料的相对介电常数；$\tan\delta$为被加热材料的介质损失系数。

为了避免对短波和超短波通信的干扰，应优先选用13.56，27.12，40.68MHz三个频段的频率，否则应选用对无线电干扰允许值符合有关标准规定的频率。

介质加热广泛应用于在自然气氛和保护气氛（例如惰性气体或真空）中，对塑料、木材、橡胶、织品、玻璃、陶瓷、纸张、竹材和食品等非导电和部分导电材料进行干燥、熔化、热合、灭虫（菌）和黏合等热加工，介质加热的用途及运行参数举例见表。

装置构成 主要由高频电源和介质加热器两部分组成，还可配置用于物料传输和加压等的辅助机械设备。高频电源采用电子管自激振荡器式（见*电炉变频电源*），高频振荡功率可为几十至几百千瓦。由于以前常用的集中参数LC谐振电路自激振荡器的振荡频率稳定性较差且又会产生严重的无线电干扰，现已被采用高Q值同轴谐振腔振荡器所取代。为抑制射频干扰，应对内含高频电路部分的外壳及其门、盖板和开口以及外部高频连线提供可靠的电磁屏蔽，必要时还应对有关电路提供滤波装置。介质加热器也称工作电容器，为具有两个或多个与高频电源相接的电极的无炉室电热设备。设计时应考虑让需要加热部位的场强最大且均匀分布。电极用铜或铝的型材，按被加热材料的形状、尺寸和加热工艺等制成板状、棒状、刀状、梳状、圆环状、转盘（柱）状、带状、球状、滚轮等多种形式。被加热材料置于两电极之间。必要时应配置由一个或多个波导管组成的滤波器，用于防止高频辐射从介质加热器向外泄漏，但允许冷却介质自由流动和/或蒸汽从被加热物料中散发出去，并可通过它观察加热材料。

为保证加热良好并满足工艺要求，介质加热装置的电源频率、电场强度、功率输出和加热时间都应适当选择。

根据不同的应用，介质加热装置产品有介质加热炉、介质干燥器、塑料介质热合机、介质黏合机等。根据作业方式，可有间歇式炉和连续式炉。

历史与发展 介质加热开发于20世纪40年代。最初，其应用仅限于聚氯乙烯薄板的焊接加工以及热固性树脂的预加热等特殊用途。第二次世界大战后，工业生产的发展促进了介质加热的发展，介质加热逐步进入木材、橡胶、塑料、皮革等加工领域。90年代以来，鉴于新材料、高科技产品开发的需要，介质加热的应用范围日趋拓宽，相继在树脂成型、树脂硬化、薄膜黏合、超厚胶合板材（175mm）制造、冷冻食肉解冻、前列腺肥大乃至艾滋病的治疗等领域获得重大开发。中国从20世纪70年代开始先后在塑料加热、木材黏合加工、橡胶硫化、食品灭菌等方面进行了介质加热的应用开发，取得了一定成绩。

介质加热的用途及运行参数举例

用　途	频率（MHz）	单位功率（W/cm^3）	电场强度（V/cm）	加热时间
木材干燥	0.3～0.75	0.003～0.05	50～400	8～30h
木材胶合	8～15	0.2～1.0	200～1200	0.3～2min
铸造泥芯干燥	6～50	1～3	200～800	2～20min
谷物真空干燥	10～12	0.08～0.09	50～100	0.75～1.20h
橡胶轮胎硫化	5～10	1.4～5.0	200～700	4～8min
薄层纸干燥	20～30	100～500	1200～5700	5～40s
厚层纸干燥	20～30	3～5	300～800	0.25～3.0h
罐头杀菌	25～35	3～7	250～300	40～110s
塑料粉加热	10～50	2～4	1500～2500	30～100s
塑料间歇式焊接	35～75	50～800	2000～15 000	0.3～20s
塑料连续滚焊	40～200	1000～1500	3000～30 000	0.03～0.2s

jinshu luhuawudeng

金属卤化物灯 (halide lamp) 用通电方法使汞和金属卤化物混合蒸气中产生电弧放电而发光的气体放电灯。它的发光原理和高压汞灯相似，不同之处是在气体放电管内增添了蒸气压力约为4665Pa的金属卤化物，如卤化钠、卤化铊、卤化铟、卤化钪、卤化镝等。金属卤化物灯与高压汞灯相比，不仅提高了发光效率，而且显色性也有明显改善。这使它大量应用于大型体育场馆、室内大厅、

主要街道、商业及对照明要求较高的工厂车间和城市景观照明。

结构　一般金属卤化物灯的结构和高压汞灯相似，如图1所示，灯内的发光管采用石英玻璃制作。为了提高发光管的管壁温度，发光内管设计成小型，在管端涂以保温膜，以控制其冷点温度。

在使用钠和碱金属卤化物灯中，发光管的封接部分，为了防止主电极和启动电极之间产生电解，在灯工作时，将启动电极从电气回路中切断，或配置可使启动电极与邻近的主电极具有相同电位的双金属片开关。另外，由于从金属支架（导线）上发出的光电子，会吸附在发光管的外壁上，从而形成电场，在电场作用下产生的钠离子，就会通过石英玻璃向外扩散。为了防止钠离子消失到发光管外面去，在外管内充入惰性气体，同时将与发光管平行的金属导线穿上耐热绝缘套管，或是采取弯曲成与发光管远离的结构。

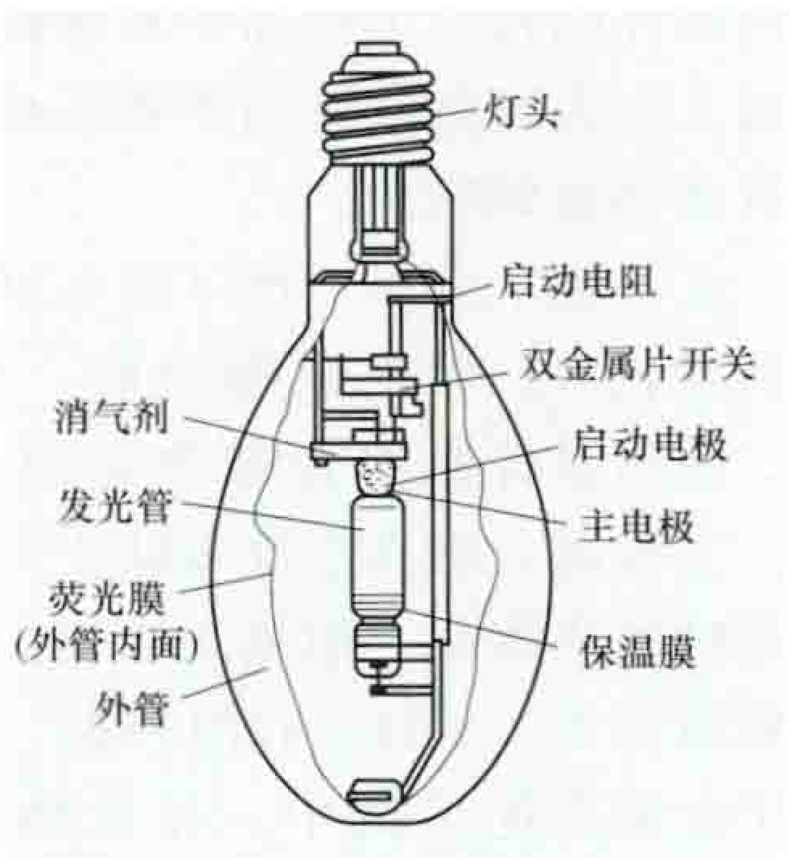


图1　金属卤化物灯的结构

在不用碱金属的金属卤化物灯中，为了防止电解，双金属片开关不设置在灯内。为了提高外管内的热绝缘性，应使灯的外管保持高度真空。对于没有设置启动电极的金属卤化物灯，须配置一个能产生脉冲电压以启动灯的镇流装置。

原理　启动后，充入发光管的金属卤化物部分或全部蒸发，因管内放电温度分布不同，呈现出分解和化合的平衡反应，所以管内同时存有卤化物分子、金属原子和卤素原子。在高温电弧的中心部分，几乎所有的金属卤化物都被分解成金属原子和卤素原子，金属原子的激发产生强烈的光辐射。由于一般的金属卤化物比汞要难以蒸发，所以在工作时，金属卤化物的分压比汞的蒸气压力要低，而且电弧中心部分的发光金属原子的密度，同样也比汞原子密度要小，但通常选择的发光金属的激发电位比汞的激发电位低，所以在放电辐射中金属光谱辐射占有支配地位。这就是金属卤化物灯的显色性比高压汞灯好的原因所在。金属卤化物灯的平均显色指数 R_a 最低的达65，高的达92，色温在5000K左右。

金属卤化物灯工作时，发光管的管壁温度比高压汞灯高，石英玻璃中含有的水分等不纯气体很容易释放出来，还有灯内金属卤化物分解出来的金属和石英玻璃缓慢地进行化学反应，游离出卤素分子使灯的启动电压上升。另外因电极中使用的电子发射物质的蒸发与溅散比高压汞灯严重，而且电极物质与金属卤化物之间也会发生化学反应。这些因素均导致金属卤化物灯的寿命比高压汞灯短1/3，在6000～9000h之内。

金属卤化物灯的电气特性与高压汞灯相似，但启动时的启动电压比高压汞灯要高。主要原因是金属卤化物灯内充的氩气压力为 4.6×10^{3} Pa，引起游离卤化物的存在而提高了灯的启动电压。

金属卤化物灯点灯时，内管的位置变化会改变灯的光电特性。因为在启动时，管内一部分金属卤化物以液态形式残存在发光管的最冷部位（冷端），内管处于水平、垂直或倾斜位置时，冷端温度会随之变化，与此相对应，管内的金属卤化物的蒸气压力也会发生变化，从而引起灯的电压、光效和光色的变化。即使金属卤化物完全蒸发后，内管的位置变化也会使发光管内的金属卤化物的分布密度发生变化，以致影响灯的光电特性。为了解决这一问题，对金属卤化物灯都规定点灯时，灯是向上垂直位置，或是水平位置，或是向下垂直位置。在灯的结构设计与使用时，都要考虑启动时内管的位置，以便获得最佳工作特性。

金属卤化物灯的种类很多，按灯的外观分类，有图2所示的几种类型，图3为应用广泛的金属卤化物外形图；按灯的金属卤化物添加剂的组成和灯的光谱特性分类有5类，见表。

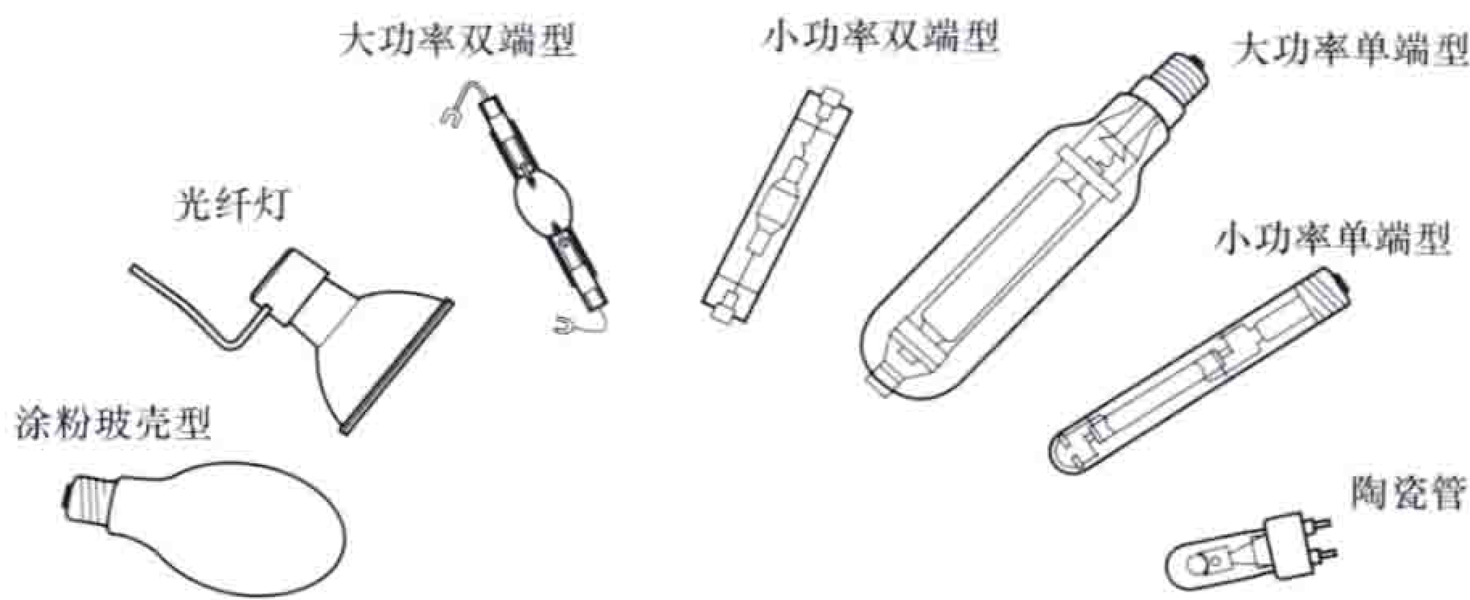


图2　金属卤化物灯外形示意图

20世纪90年代后期，陶瓷电弧管金属卤化物灯开始逐渐推向市场。多晶氧化铝陶瓷是一种半透明材料，直线透光率不超过30%，实际透光率高达96%～98%，超过玻璃和石英，且可以承受比石英玻璃高200℃以上的高温，制成电弧管后正常运转温度可以高达1200℃。与传统石英电弧管金属卤化物灯相比，热导率较高，电弧管温度分布均匀，冷端温度在900℃以上，可使金属卤化物充分蒸发，这是陶瓷金属卤化物灯的光效和显色指数高而稳定的原因。另外，多晶氧化铝泡壳的热稳定性和化学稳定性很高，与充入电弧管的材料无化学反应，因此整体性能稳定、光衰小、寿命长。陶瓷金属卤化物灯经过长时间使用后其色漂移及色容差均较其他金卤灯明显稳定得多，被大量应用于商业场所的照明中。不同类型金属卤化物灯的颜色稳定性见图4。


图3　常见金属卤化物外形

金属卤化物灯按添加金属卤化物和光谱分类

类号	添加的金属卤化物	光谱特性	应用
1	钠-铊-铟(Na-Tl-In)	这三种金属卤化物组合在一起，在可见光区内具有强烈的线状光谱，形成发射白光的金属卤化物灯	体育场馆、高大厅堂、街道广场、高大车间、景观照明等
2	钪-钠(Sc-Na)	这两种金属卤化物组合在一起，在可见光区内长波方向的线状光谱比第一类丰富，光源颜色成金白色	
3	镝-钬-铥(Dy-Ho-Tm)	这三种金属卤化物组合在一起，除在540nm波长有一较强的线状光谱外，其他都是连续光谱，形成近似日光色光源	
4	锡-铯(Sn-Cs)	这两种金属卤化物组合在一起，在可见光区内的光谱组成基本上是连续的，形成日光色光源	水下照明、照相复印、光化合成等特殊照明需求
5	单一的金属卤化物（铊、铟、锂、镓等）	这些金属卤化物都可产生很强的共振辐射，形成色纯度很高的光谱辐射光源	

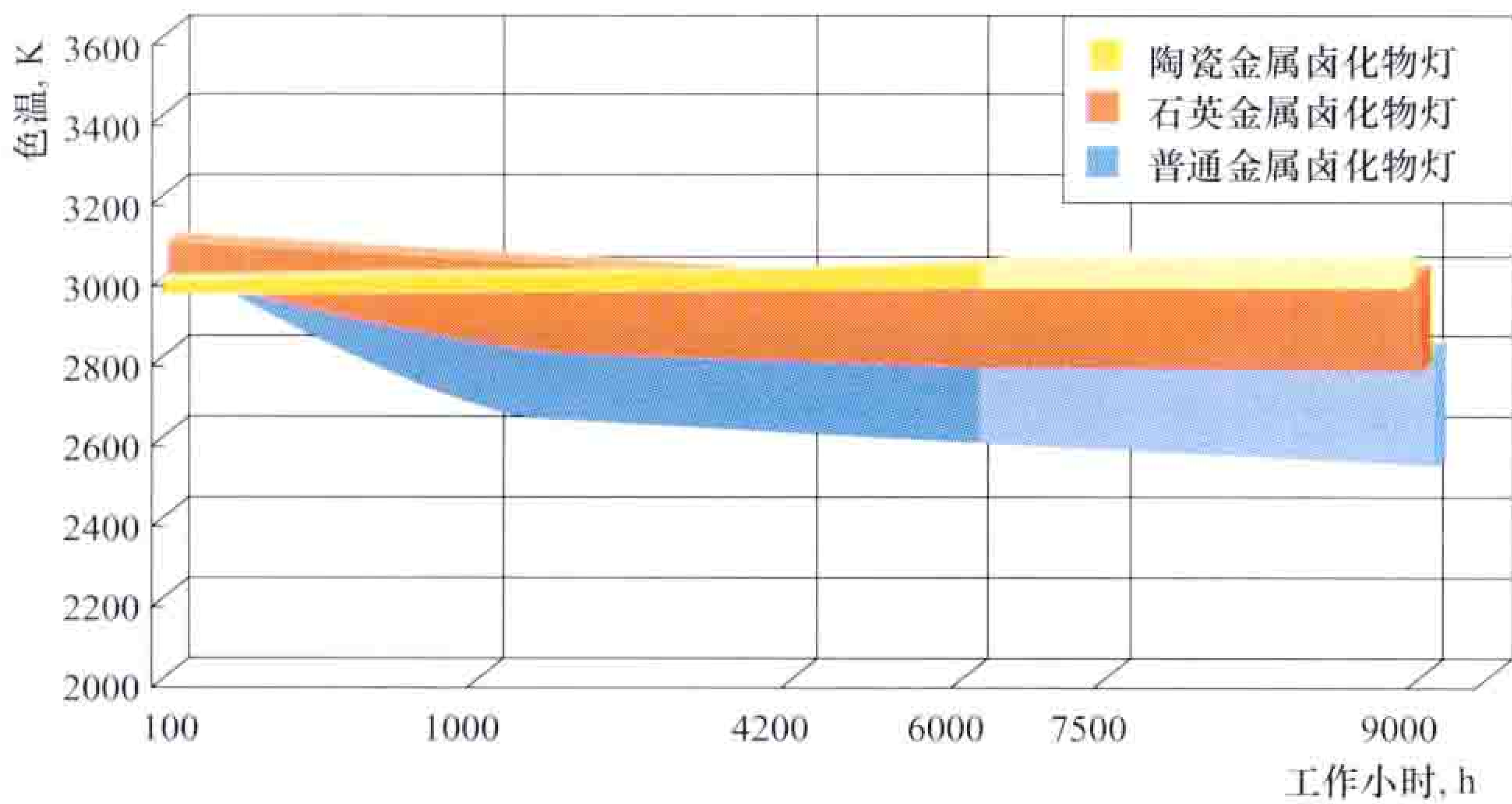


图4 金属卤化物灯的颜色稳定性

jinhuxian

进户线 (service tails) 从低压配电线路的接户线至用户受电设备（或计量设备）之间的一段线路。在中国，进户线也就是从供电企业与用户责任分界点起接至用户受电设备（或计量设备）之间的一段线路。一个用户通常只设一个进户点，选择进户点时，建筑物应牢固，便于维修。进户线严禁与通信线、广播线混在一起。进户线一般归用户自行运行维护。

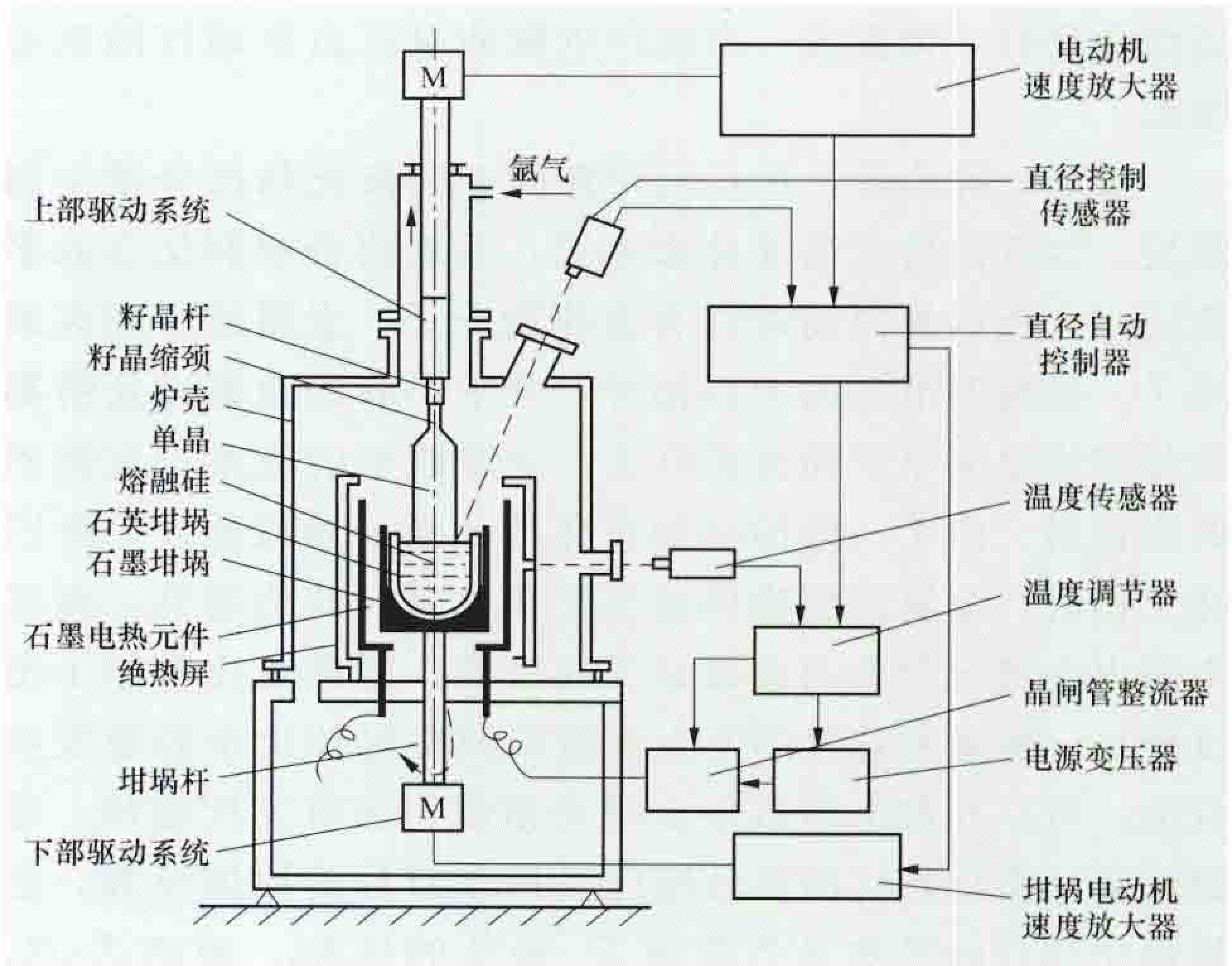
进户线通过穿墙套管进入户内时，选用的进户线导线截面应考虑在套管内导线散热条件较差环境下的载流量，因此往往需较接户线导线截面为大。由低压架空配电线路供电的用户，进户线的导线应为绝缘导线。

进户线在进屋前应将导线弯制成一个弧形滴水弯头，以防雨水沿线进入户内引起电气短路事故。进户线下垂点的高度应符合国家设计规程规定的对地距离和安全距离。

jingti shengzhanglu

晶体生长炉 (crystal growing furnace) 在真空状态或惰性气体保护下，用来熔化和提纯半导体材料（如硅、锗）、激光材料（如钇铝石榴石）、高纯金属材料（如钨、钼）等使之生长为单晶体或多晶体的电炉。通常由真空室、抽真空系统和充气系统、加热系统、升降和旋转机构、温度和压力等的测量和控制系统及其他辅助设备组成，对控制和传动都要求十分精确。晶体生长炉根据所生长的晶体结构分为单晶炉和多晶炉，前者根据不同的提纯方法又分为直拉法单晶炉和区熔法单晶炉，后者用得较多的有多晶硅铸锭炉。

直拉法单晶炉 可以用电阻加热，也可以用感应加热，以前者较多。用电阻加热时，它是一种精密的真空电阻炉。使用最普遍的为硅单晶炉，其典型结构示意如图所示。工作时，在真空度不低于10^{-3}Pa的工况下将原料——多晶硅加热熔化。坩埚上方有一根提拉轴，其终端固定有一粒直径为5～10mm的籽晶。开始时，籽晶浸入温度略高于硅熔点的熔液中。籽晶轴一方面旋转，一方面以约1mm/min的速度缓慢上升，同时坩埚做反方向旋转。在严格的工艺条件下，熔融硅将按籽晶的结晶方向凝固成硅单晶。这种单晶炉是20世纪50年代出现的，制造集成电路和晶体管的无位错硅单晶绝大部分都用它生产。在中国，硅单晶的质量可达250kg，直径达16英寸（406.4mm），直径误差在±（0.5～2）mm内。拉制其他单晶的炉子结构与其类似。



直拉法单晶炉结构示意图

区熔法单晶炉 区熔法是靠局部加热使材料锭条上出现一个狭窄的熔化区，并使熔化区缓慢向一个方向移动，利用杂质在固相和液相间的熔解度差异使材料得以提纯。区熔法硅单晶炉的基本结构与直拉法单晶炉类似，但炉内没有坩埚。被提纯的多晶硅棒夹在上下两轴之间，由套在外面的扁环形感应线圈进行感应加热。硅棒下端附有籽晶。感应线圈先位于硅棒下端，在硅棒中加热出一个狭窄的熔化区，然后上下两轴互相做正反方向旋转，同时感应线圈和熔化区缓慢上升。在严格的工艺条件下，硅棒中的杂质将富集到棒的一端而使棒的其余部分得到提纯并形成单

晶。这种炉子的特点是不用坩埚，可防止氧、碳进入单晶，因此在制造反向电压硅整流元件用单晶方面占重要地位。但这种炉子难以制造大直径单晶，其温度控制和直径控制也较困难，限制了它的应用。金属材料的提纯多用区熔法，炉子可以有多种不同结构，常采用电子束加热。

多晶硅铸锭炉　把化学法得到的高纯度硅熔融并调整成分，然后采用定向长晶凝固技术铸成大尺寸方形多晶硅锭的多晶炉，是光伏产业中最重要的设备之一。生产的多晶硅铸锭经切片制成太阳能电池。该炉通常采用热交换法与布里曼法相结合的晶体生长方法，相比其他硅单晶生长方法，其特点是单台产能大，单炉产量可达上千千克，切片易切成方形，对硅原料的要求也稍低。

该炉的多晶硅铸锭工艺包括加热、熔化、长晶、退火和冷却。加热和熔化时，保温层和底部的隔热层闭合严密，使内部热量不外泄，以保证有效和均温的加热。长晶时，充入保护气，装有熔融硅料的坩埚不动，将保温层缓慢向上移动，坩埚底部的热量通过保温层与隔热层之间的空隙发散出去，通过气体与炉壁的热交换，逐渐降低坩埚底托的温度。在此过程中，要求液固界面形成比较稳定的温度梯度，以利于晶体的生长；结晶好的多晶硅缓慢离开加热区。

加热系统和保温层升降系统是多晶硅铸锭炉满足工艺要求的关键。加热系统通常采用电阻发热体加热，要求形成恒定的温度场并对温度进行精确的控制。保温层升降系统为对位置和速度进行精确控制的精密机械，以确保长晶良好。中国多晶硅的生产规模巨大，占世界总产量的35%，单炉产量可达800～1000kg，最大铸锭尺寸为1040mm×1040mm×(400～500) mm。

jingzhaguan xiangwei kongzhi zhiliu tiaosu

晶闸管相位控制直流调速

(speed control of DC motor by phase-controlled of thyristor)　通过控制晶闸管整流装置的触发脉冲相位，把交流电压变换为可调的直流电压，实现直流电动机调速的技术。在交流进线电源电压的每个周期内，按一定规律给晶闸管施加触发脉冲，把交流输入电压变为直流电压输出，同时利用改变触发脉冲相对于交流输入电压的相位，使直流输出电压做相应变化，从而使直流电动机转速得到调节。

简史　20世纪50年代末期晶闸管相位控制方法开始应用于直流电动机的励磁控制。60年代初大功率晶闸管进入实用阶段，从而可以供电给电动机电枢回路。晶闸管直流调速的典型框图如图1所示。与电动发电机组直流调速相比，晶闸管相位控制直流调速具有操作简单、工作可靠、体积小、振动及噪声小、组装灵活、占地面积小、运行效率高和动态性能好等优点，在60年代发展迅速，大多数新型的直流电动机调速系统都采用晶闸管变流器，其中应用最广的就是晶闸管相位控制调速。在70、80年代以后此方法很少使用。

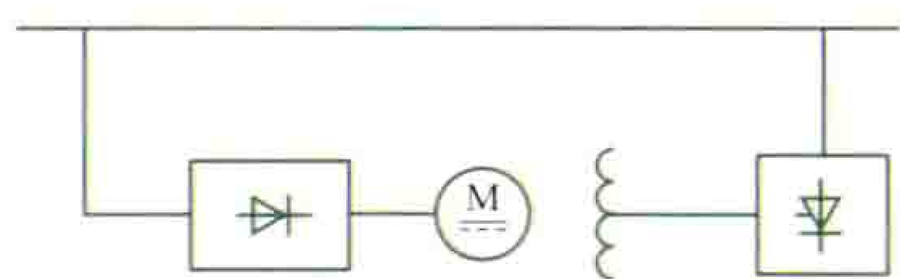


图1　晶闸管直流调速典型框图

分类与原理　按交流电源相数分有单相和三相两类；按接线方式分有零式和桥式两种；按对直流电动机转向控制分有不可逆直流调速和可逆直流调速。

单相晶闸管相位控制不可逆直流调速　其主电路构成有单相半波、单相全波、单相半控桥式和单相全控桥式四种方案。这类电路结构简单，适用于功率小于5.5kW的直流电动机调速，其中应用最广的是全控桥式整流电路，如图2所示。

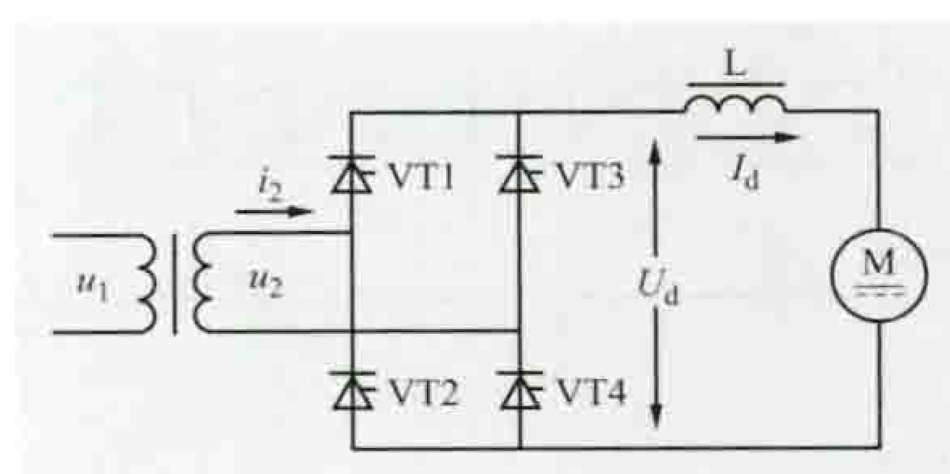


图2　单相全控桥式整流电路

单相全控桥式晶闸管整流装置主电路由变压器（或进线电抗器）、4只晶闸管（VT1～VT4）和平波电抗器（L）构成。平波电抗器的作用是减小电枢回路电流的脉动分量和在电枢电流最小时保持电枢电流连续，假定L的电感值足够大，则可保持该电路中各电压和电流波形连续，如图3所示。

从图3可以看出：利用晶闸管整流电路，可以把交流输入电压 u_2 转换成脉动的直流输出电压 U_d，而且改变触发脉冲的延迟角 α，就可改变直流输出电压的平均值。根据图3，可计算出电路中主要电量之间的关系。

由于晶闸管本身需要有一个关断时间，该时间一般为数十微秒，对应的关断角度通常取1°～2°，换相过程存在一个重叠角，通常取12°～15°，加之考虑电网电压波动及系统参数的变化而取的安全裕度角（10°左右），因而超前角 β（$\beta=180°-\alpha$，又称逆变角）有一个最小值（20°～25°）限制，以确保逆变状态下可靠的换相。

图3　单相全控桥式整流电路电压、电流波形

三相晶闸管相位控制不可逆直流调速　其主电路构成有三相零式、三相半控桥式、三相全控桥式。在大功率装置中，为减小电压脉动，用两个三相全控桥式电路的串联或并联组成12相系统。但应用最多而又最基本的是三相全控桥式电路，如图4所示。

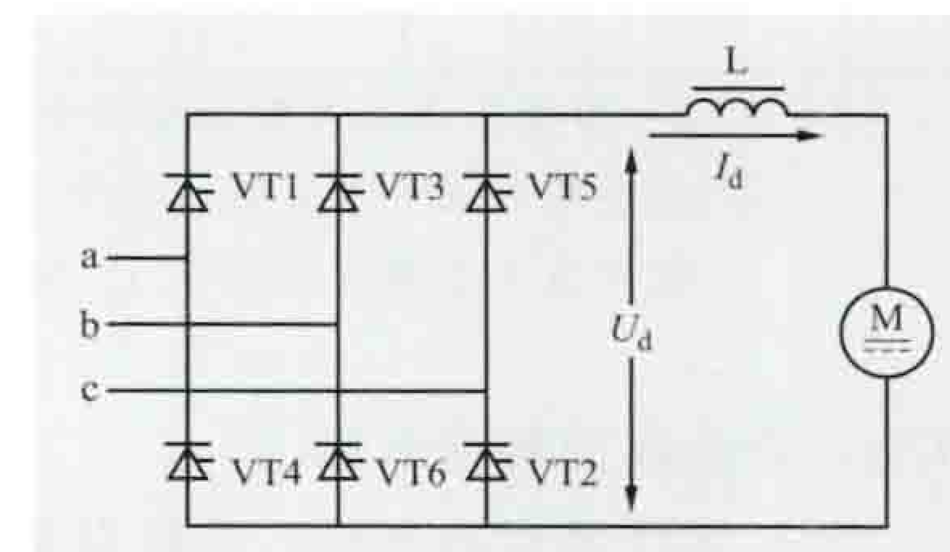


图4　三相全控桥式整流电路

三相全控桥式整流装置主电路与单相桥不同的是进线为三相对称电源，晶闸管桥由6只元件（VT1～VT6）组成。在平波电抗器L的电感值足够大时，则可得该电路中各电压、电流波形，如图5所示。

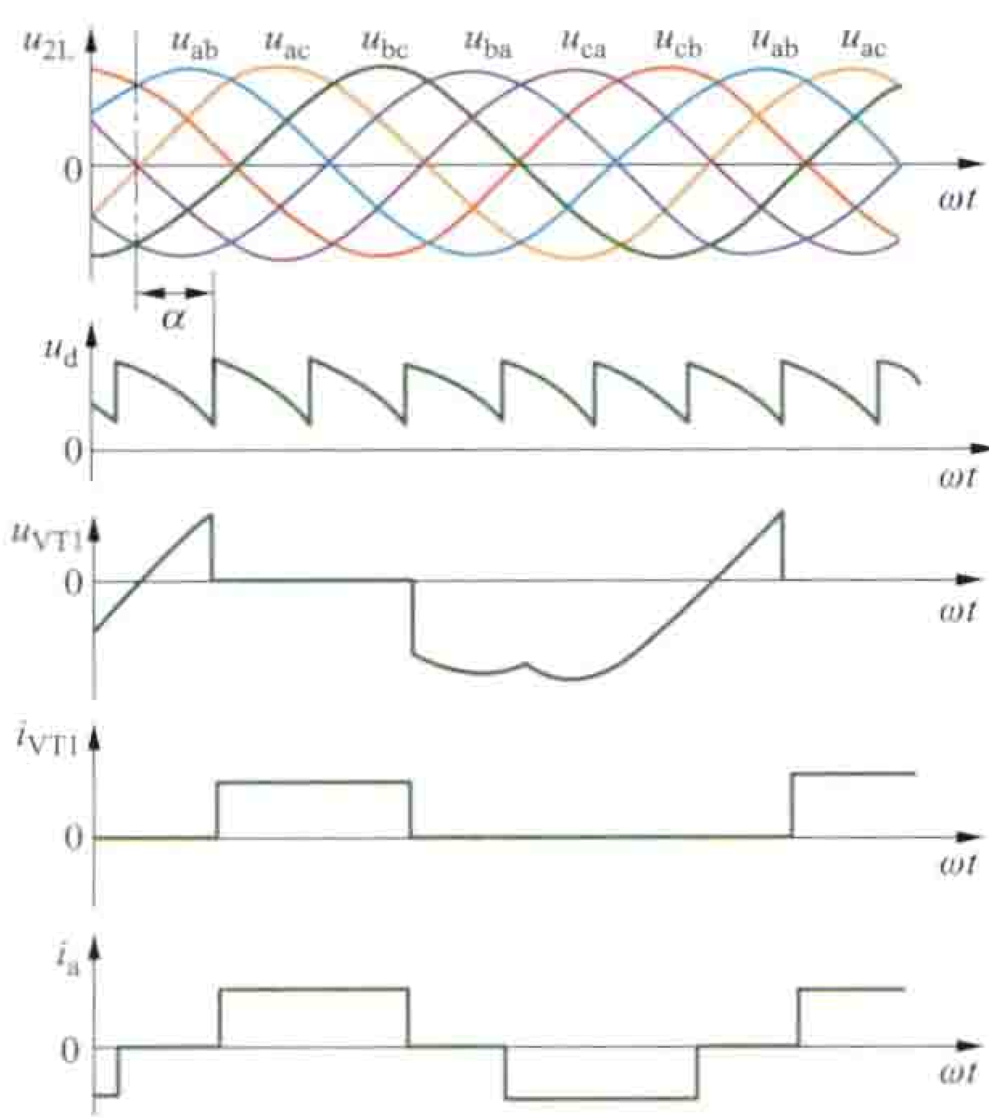


图 5 三相全控桥式整流电路电压、电流波形

利用图 5 可计算三相桥电路各电量关系。表 1 列出各种整流电路中主要电量间的关系。表中 U_d 为整流电路的整流电压平均值、U_{RU} 为晶闸管所承受的最高反向电压、I_N 为晶闸管额定电流、I_2 为交流进线电流有效值、U_2 为交流输入电压有效值、I_d 为直流电流。

晶闸管相位控制可逆直流调速　由于晶闸管具有单向导电性，在电动机励磁电流方向不变的情况下，如表 1 所列的单相半控桥和三相半控桥电路，其电动机只能在一个象限内受控。其他电路的电动机也只能在两个象限内受控。为使电动机能实现四象限运行，可利用两组可以实现两象限运行的主电路构成可逆主电路，如图 6 所示。

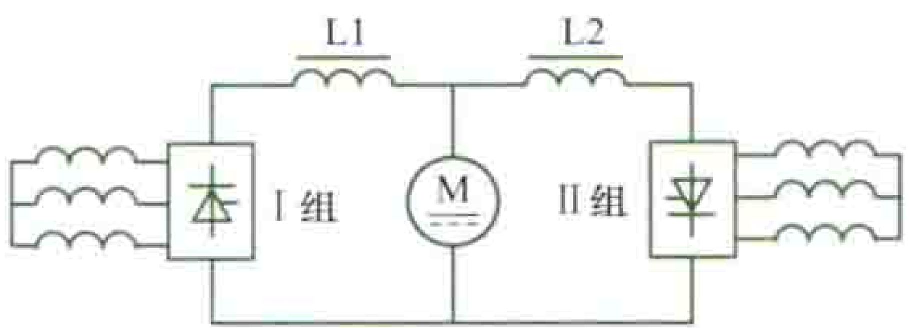


图 6 晶闸管供电的可逆直流调速

图 6 所示电路有有环流、无环流、给定环流 3 种基本控制方式。

（1）有环流控制方式。通常设整流组（正向组）α_p 角和逆变组（反向组）β_b 角相等，即采用 $\alpha_p=\beta_b$ 的控制方式。其特点是正向组供给负载电流，正向组和反向组间瞬时电压差引起环流，需由电抗器将环流限制在负载电流的 5%～10% 以内。当制动时，可同时降低整流电压和逆变电压，并小于电动机反电动势，从而正向组被截止，反向组真正进入逆变状态，产生反向制动电流。

表 1　各种整流电路中主要电量间的关系

接法	线路图	U_d/U_2	U_{RU}/U_2	I_N/I_2	I_2/I_d	接法	线路图	U_d/U_2	U_{RU}/U_2	I_N/I_2	I_2/I_d
单相全波	M	0.9	2.83	0.45	0.707	三相半桥	M	2.34	2.45	0.367	0.810
单相半桥	M	0.9	1.41	0.45	1	三相全桥	M	2.34	2.45	0.367	0.816
单相全桥	M	0.9	1.41	0.45	1	双桥串联	M	4.68	2.45	0.367	0.810
三相零式	M	1.17	2.45	0.367	0.577	双桥并联	M	2.34	2.45	0.183	0.408

注：1. U_2 为变压器二次侧相电压有效值。

2. 双桥串联或并联是指变流变压器有两个二次侧绕组（或两台变压器）分别接成星形和三角形组成两组三相桥式整流后再串联或通过平波电抗器并联构成 12 相整流的线路。

（2）无环流控制方式。其特点是通过逻辑控制来保证主电路的正常工作。逻辑控制的依据是由闭环系统中电枢电流给定值来决定哪一组主电路工作。两组主电路切换条件是必须在原工作一组主电路可靠封锁并恢复阻断能力后才能使另一组主电路投入工作。

（3）给定环流控制方式。属于有环流控制方式中的一种形式。其特点是当电枢电流小时，两组主电路之间保持有一定的环流值，使主电路电流连续，以保证系统快速性。而在电动机电流大时，使环流减小，以降低变压器的容量和电抗器的尺寸。它克服了按 $\alpha_p=\beta_b$ 控制方式中存在的环流随 α 角而变化的缺点。

表 2 晶闸管相位控制可逆直流调速方案比较

反向形式	反向方法	晶闸管主电路	传动型式	特点
电枢电流反向	转换接触器	三相 本 F R M R F 本	I型传动	响应尚可，但可动的接触器需要维修，接触器转换要求有电枢零电流检测
电枢电流反向	双重变流器 有环流型	三相 本 M 本 本	II型传动	响应最快，两组变流器同时开通，但两组变流器中的损耗再加上限制环流用的电抗器的损耗，致使效率降低
电枢电流反向	双重变流器 无环流型	三相 本 M 本 本	III型传动	响应较快，每次只开通一组变流器，为防止两组变流器同时开通，要求有电流检测和延时环节
励磁电流反向	双重交流器	三相 本 M 本 本	IV型传动	造价便宜，响应快慢取决于强制励磁
励磁电流反向	转换接触器	三相 本 M F R F R 本	V型传动	造价便宜，响应快慢取决于强制励磁

晶闸管相位控制可逆直流调速装置主电路中变压器二次电压 U_2 与整流电压 U_d 的关系，应考虑最小逆变角 β_{min} 的限制，即

$$U_d = AU_2\cos\alpha_{min} = AU_2\cos\beta_{min} - \Delta U$$

式中 A 为电路常数；ΔU 为最大逆变电流时，两组主电路间电压降。

其他各主要电量之间的关系，仍可按表 1 计算。

晶闸管相位控制可逆直流调速方案的比较，如表 2 所示。

晶闸管相位控制直流调速，在交直流主电路中将产生各次电压和电流谐波。交流电源回路内的电流谐波将使电网波形畸变，同时还存在着功率因数低、无功冲击大的缺点。因此对于容量较大的晶闸管相位控制直流调速装置或在弱电系统不允许受干扰的场合，应考虑增设谐波吸收及无功补偿装置。

参考书目

黄立培．电动机控制．北京：清华大学出版社，2003．

李发海，王岩．电机与拖动基础．4 版．北京：清华大学出版社，2012．

jingguan zhaoming

景观照明 （landscape lighting） 利用灯光再现城市人文和自然景观夜间形象的电气照明，又称夜景照明。照明的对象主要包括山、水、建（构）筑物、道路、广场、公园、绿地、室外广告及城市附属设施等。夜景照明不仅可美化城市，展现城市风采，增加城市魅力，而且可促进旅游业、商业、交通运输业和照明行业的发展，减少交通事故和夜间犯罪，提高人的安全感等。

照明方式 夜景照明方式主要有建筑化夜景照明、投光（泛光）照明、轮廓照明、内透光照明和其他照明 5 种。

建筑化夜景照明 将照明光源或灯具和建筑立面的墙、柱、檐、窗或墙角等部分的建筑结构融合为一体的夜景照明方式。建筑化夜景照明的优点：①能较好地体现建筑师的构思创意和建筑物的特征，实现了照明和建筑的有机结合；②外观造型和色彩完全与建筑融为一体，照明和建筑和谐统一，景观的艺术装饰效果好；③照明设备安装与建筑施工同步进行，省时省力；④照明用灯的单灯功率较低，光源光效高，用灯量也较少，且都安装在建筑物立面上，可降低工程造价，节约能源，减少光污染。

投光（泛光）照明 用投光灯将光直接照射建筑立面，在夜间重塑建（构）筑物形象的照明方式。其照明效果不仅能显现建（构）筑物的全貌，而且将建（构）筑造型、立体感、饰面颜色和材料质感，乃至装饰细部处理都能有效地表现出来。北京的八达岭长城（见图 1）、天安门城楼、人民英雄纪念碑、上海外滩（见图 2）等不少建（构）筑物的夜景照明均采用了这种方式。投光（泛光）照明应具备良好的投光照明条件与要求：①要按规范确定好被照建筑立面各部位表面的照度或亮度，提高夜景照明的层次感，而不是简单地把整个建（构）筑物均匀地照亮，也不能在同一照射区内出现明显的光斑或暗区以致扭曲建（构）筑物形象；②合理选择投光方向和角度，一般不要垂直被照面投光，以致降低照明的立体感；③投光设备的安装应力求隐蔽，尽量做到见光而不见灯；④谨慎使用灯光颜色，防止色光使用不当而破坏建筑风格；⑤投光不能对人和环境产生眩光和光污染。

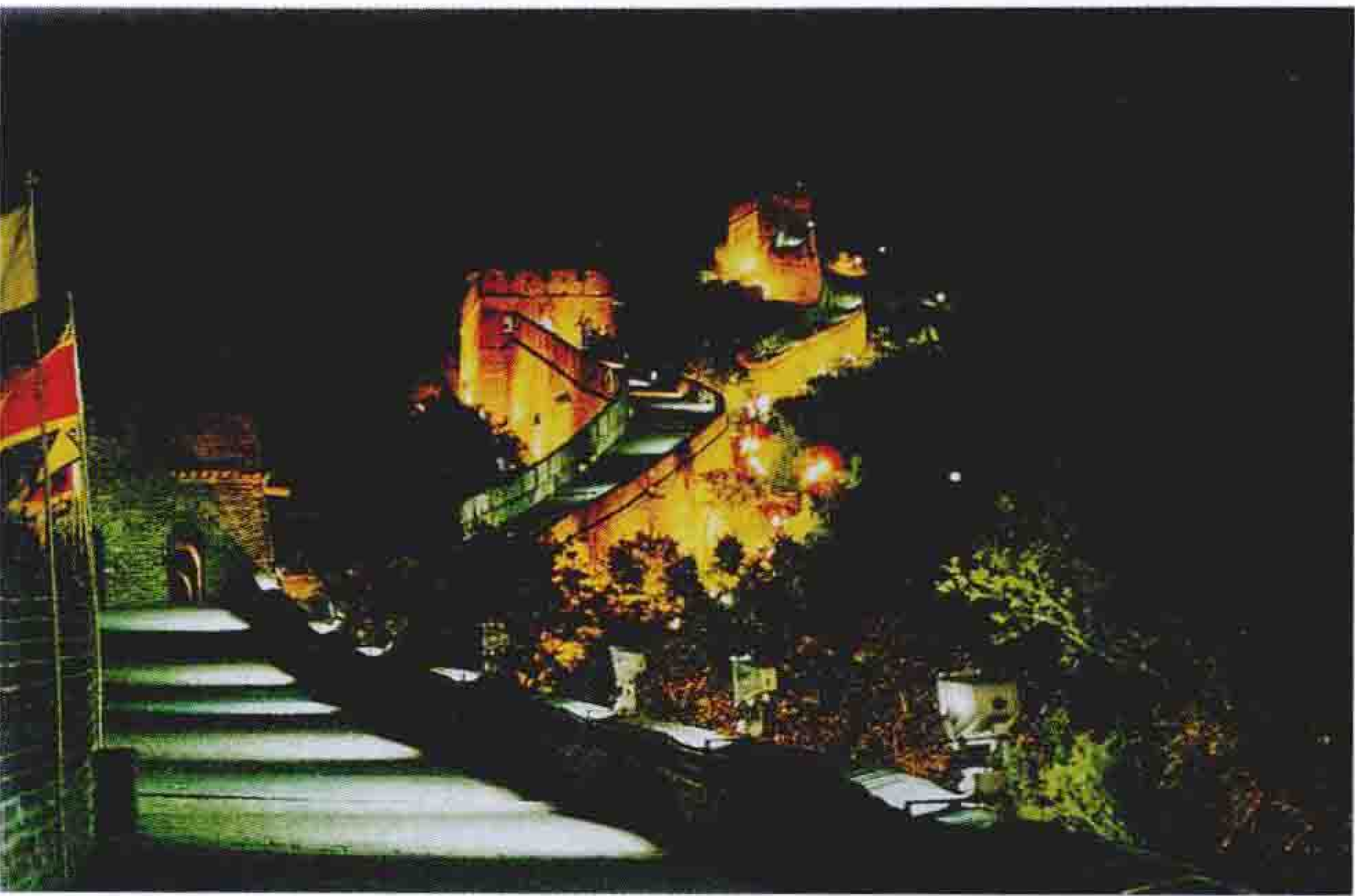


图 1 八达岭长城夜景（肖辉乾 摄）

轮廓照明 用点光源每隔一定间距连续安装形成光带，或用串灯、霓虹灯、美耐灯、导光管、通体发光光纤、发光二极管灯及灯带等直接勾画建筑轮廓。早期的建（构）筑物夜景照明几乎都使用这种照明方式。单独使用这种照明方式时，建（构）筑物墙面是暗的，应同时使用投光照明和轮廓



图 2 上海外滩建筑群夜景

照明。北京天安门城楼在轮廓照明的基础上增加投光照明，成效显著。另外，对一些轮廓简单的方盒式建筑不宜使用这种照明方式。

内透光照明 利用室内光线向外透射形成夜景照明效果。做法有两种：①利用室内一般功能性照明灯光，在晚上不关灯，让光线向外照射。大多数内透光夜景照明属于这一种。②在室内靠窗或需要重点表现夜景的部位，如玻璃幕墙、柱廊、透光结构或艺术阳台等部位专门设置内透光照明设施，形成内透光发光点、带、面或发光体来表现建（构）筑物的夜景。内透光照明的最大特点是照明效果独特，节省费用，维修简便。如北京远洋大厦、环球贸易中心建筑群（见图 3）、上海淮海东路的现代化高楼等使用内透光照明取得了较好的照明效果。又如著名的法国巴黎埃菲尔铁塔，最早设计的是外投光夜景照明，因塔高，塔体透空，照明效果不好，后来改用内透光照明，将照明灯安装在塔架内部，从内部照明塔体，使塔体从下到上均能照亮，形成晶莹剔透、气势恢弘的照明效果。广州新电视塔的夜景照明也采用了这一照明方法，将发光二极管投光灯装在塔架节点内侧进行照明，成功地再现出塔体雄伟而迷人的夜色景观。



图 3 北京环球贸易中心大楼内透光夜景

其他照明 利用激光、光纤、全息摄影，特别是电脑技术等高新科技营造特殊夜景照明效果的照明方式。如中国广州天河体育场庆祝香港回归晚会的夜景照明，使用大功率激光器形成光柱在空中进行激光造型表演，使整个场地的夜景显得极为热烈壮观；上海东方明珠电视塔（见图 4）上球的 360 个结点上使用端头出光的光纤，形成一个个明亮的光点作球体的夜景装饰照明，亮点的明暗和颜色变化由电脑控制，有规律变化造成“礼花爆开”“玉珠悬空”和“满天星斗”的奇特照明效果，给人们以美的享受。

发展趋势 未来城市夜景照明将越来越引起社会各界，特别是城市建设部门的重视；城市夜景照明功能将逐步扩大，要求越来越高；照明的个性化和艺术化，抓住特征，突出重点，兼顾一般，使用多元空间立体照明手法再现城市或建（构）筑物形象的夜景照明实例越来越多；夜景照明器材、设备和方法迅速向高新科技发展；绿色照明和防止夜景照明的眩光及光污染越来越引起人们的重视。

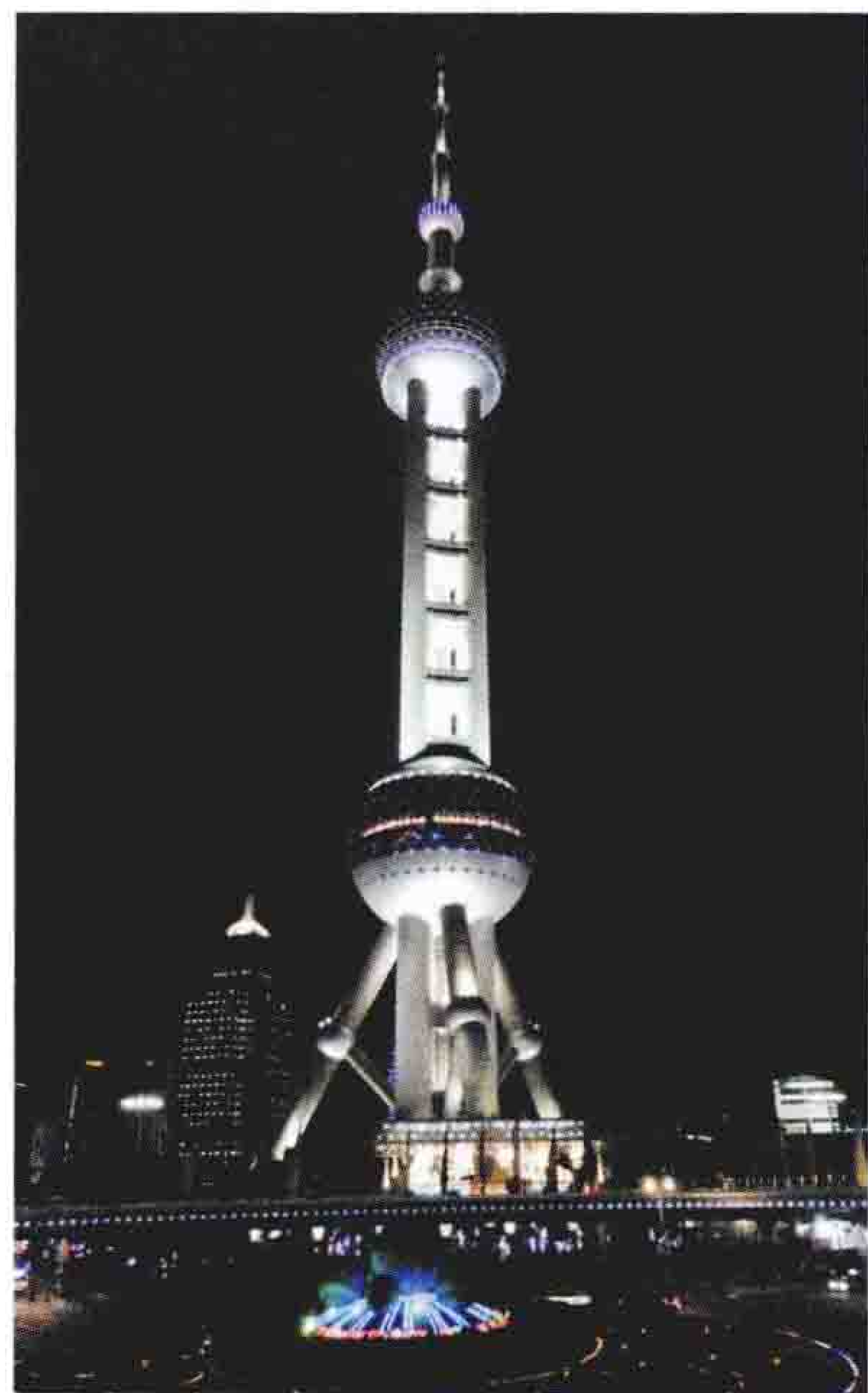


图 4 上海东方明珠夜景

jingdian

静电 （electrostatic） 两种物质紧密接触后再分离或物质间相互摩擦而使物质带电的现象。虽然静电的电量（或能量）不大，但电压较高，可能引起爆炸、火灾、人身伤亡、电子器件失效和损坏，需采取加速静电泄漏、进行静电中和、抑制静电产生等措施加以消除。

特点 ①电量不大而电压较高，即静电电流很小，一般只有微安级至皮安级，而静电电压则高达数千伏或数万伏。②绝缘体上静电消散很慢。③存在感应现象，即金属导体在静电场中，其表面的不同部位可以感应出不同的电荷或导体上原有电荷经感应后可重新分布，并可能产生很高的电压。④静电能够被屏蔽。空腔导体在静电场中达到平衡时，空腔内电场强度为零；如果空腔内有电荷，且其外表面接地，则其外表面上的感应电荷泄入大地，导体外部电场场强为零。这两种情况都叫作静电屏蔽。

危害 静电使人体和生产遭受的危害有：①爆炸和火灾。静电火花可能引燃易燃易爆混合物，从而导致火灾和爆炸。②电击。由于静电能量小，静电电击不至于直接使人致命，但可能因电击引起人体坠落、摔倒等事故，还可能使工作人员精神紧张而引起操作事故。③静电可能直接影响生产，降低产品质量。④静电能引起电力、电子元件误动作，干扰计算机的正常工作。

措施 消除静电的主要措施有泄漏法、中和法、工艺控

制法。

（1）泄漏法。采取接地、增湿、加入抗静电添加剂等措施，让已产生的静电电荷比较容易泄漏、消散。

（2）中和法。带静电的物体与所接触空气中的电子或离子中和而失去电荷，从而使静电中和。采用静电中和器或其他方式产生与原有极性相反的电荷，使已产生的静电得到中和而消除。这种中和极为缓慢，不易察觉。如果使带静电的物体发生气体放电，就会迅速中和。放电是静电中和的主要方式。静电放电常见的形式有电晕放电、刷形放电、火花放电 3 种。①电晕放电。电晕放电发生在带电体尖端附近或曲率半径很小处附近的局部地域内，电场强度很高，空气局部电离而形成电晕，电晕放电时有可见的淡紫色光，并可听到嘶嘶声。②刷形放电。刷形放电发生在两级间的空气因击穿而形成的放电通路上，该通路分布在一定空间范围内，且有较多分叉，放电时伴有声光。③火花放电。两级间的空气被击穿为没有分叉的通路，电极上有明显的放电集中点，放电瞬间能量集中释放，并伴有短促爆裂声和明亮的闪光。这种放电危险性最大。

（3）工艺控制法。如选用适当的材料和设备，降低液体、气体和粉体的流速，改进液体注入方式，消除杂质等可以限制静电的产生和积累。

在有爆炸危险的场所，可以利用静电屏蔽，防止静电危害。

jingzhi tongbu buchangqi

静止同步补偿器 (static synchronous compensator in distribution system，D-STATCOM)　一种并联在配电网络上，采用以脉宽调制（PWM）或者其他电压/电流波形合成技术进行控制的电力电子变流器来产生无功功率的无功补偿装置，又称动态静止同步补偿器。与用于输电网的静止同步补偿装置（STATCOM）相比，D-STATCOM 具有功率等级低，脉宽调制载波频率高，动态特性好的特点。

用途　D-STATCOM 是基于电力电子技术的一种重要的电压质量调节器，并联在配电线路，尤其是在公共连接点（PCC）附近，通过向（从）公共连接点注入（吸收）满足要求的电流，有效改善因非线性、不平衡冲击负荷或电力系统故障等造成的快速变化的电能质量扰动问题，对补偿电压暂降与闪变特别有效。D-STATCOM 还可以用于交直流功率变换，如为一条直流馈线或者一个微型直流配电网供电，特别适用于分布式发电系统。

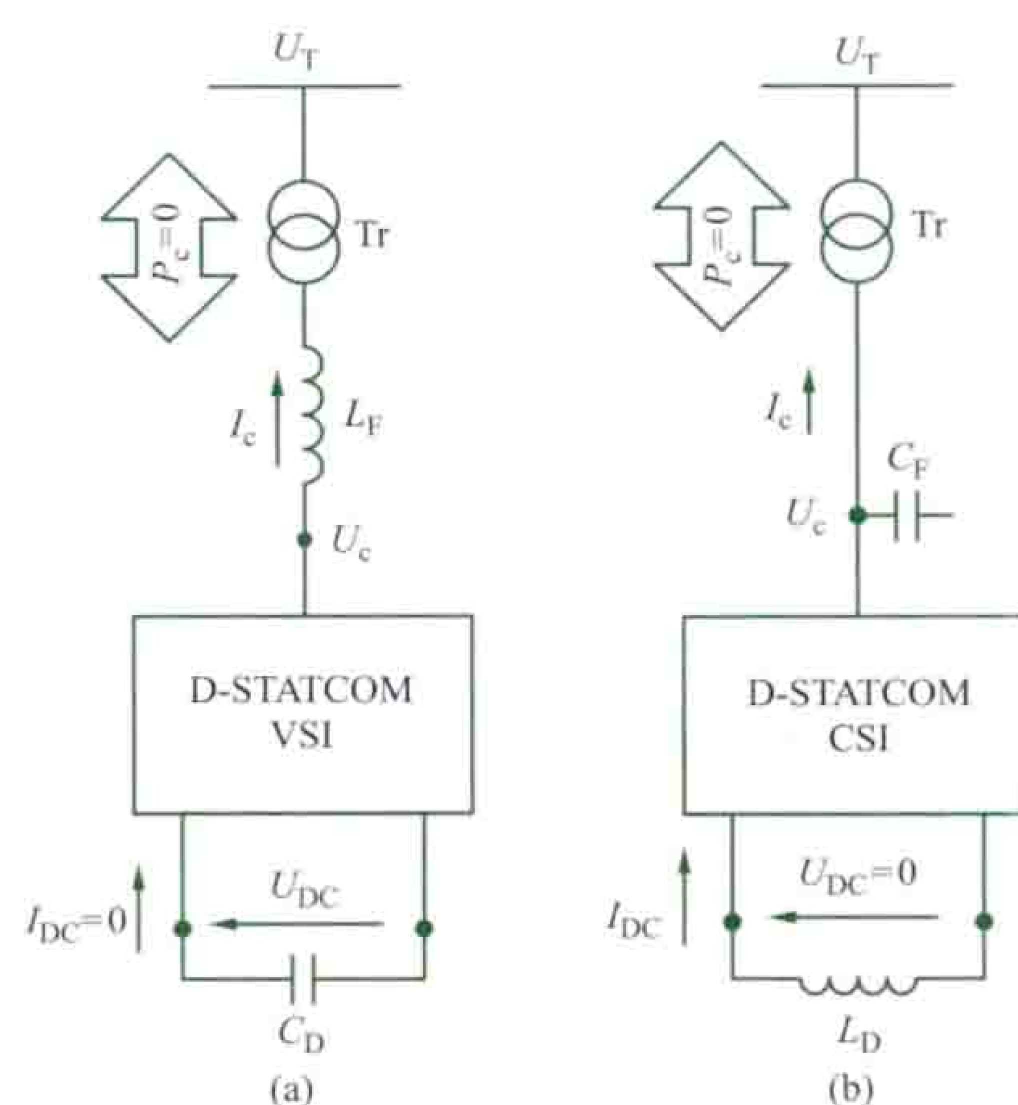
组成及原理　D-STATCOM 具有基于电压源逆变器（VSI）拓扑和基于电流源（CSI）拓扑两种结构，补偿装置都是由一个具有自关断能力的半导体开关阵列［绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、栅极可关断晶闸管（GTO）、集成门极换流晶闸管（IGCT）等］通过一个相对较小的无源滤波器连接到配电馈线上的，其拓扑结构见图。对于 VSI 拓扑，交流侧通过电抗器连接到馈线，直流侧存在一个电压源（C_D）。对于 CSI 拓扑，交流侧并联有一个电容器（C_F），直流侧存在一个直流源（L_D），实际工程中一般采用 VSI 拓扑结构。VSI 结构中各组成功能为：①电压支撑电容 C_D，其作用是为装置提供一个电压支撑；②由全控型半导体开关阵列组成的电压源逆变器，通过 PWM 技术控制通断，将电容器上的直流电压变换为具有一定频率和幅值的交流电压；③耦合变压器或电抗器，将大功率变流装置与电力系统耦合或连接，并且将逆变器输出电压中的高次谐波滤除，使 D-STATCOM 的输出电压接近正弦波。

D-STATCOM 的基本工作原理是将自换相桥式电路通过电抗器或者直接并联到电网上，先将电网电压整流成直流并保存在一组直流电容器（或电抗器）内，逆变器通过适当调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值，或者直接控制其交流侧电流，使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流，从而实现动态无功补偿的目的。

D-STATCOM 有负载补偿和电压调节两种运行模式：①负载补偿模式。D-STATCOM 采用电流控制模式，控制系统通过时域或频域算法计算出参考电流值，在控制器作用下 D-STATCOM 产生相应的补偿电流以补偿非线性负载电流中的谐波分量、不对称分量和基波电流分量。②电压调节模式。为 VSI 拓扑结构，采用电压控制模式，控制系统的直流电压控制器和端电压控制器分别决定滤波器电感 L_F 上与端电压 U_T 相垂直和相平行的电压分量，其中垂直电压分量决定了输出的有功功率，平行电压分量决定了无功功率，VSI 根据控制器输出的参考交流电压，调节输出相应幅值和相位的电压 U_c，即输出所需的无功功率。

特点　D-STATCOM 与自动投切电容器组装置和静止无功补偿装置（SVC）相比：电容和电感储能元件容量小，动态响应时间快，可精准控制电压，具有自适应功能；感性无功和容性无功连续可调，可对频率和大小都变化的谐波以及变化的无功功率进行补偿，不容易和电网阻抗发生谐振；可以跟踪电网频率的变化。

D-STATCOM 与动态电压恢复器（DVR）和统一电能质量控制器（UPQC）相比：D-STATCOM 属于并联补偿装置，具有补偿不受馈线短路影响的特性，动态电压恢复器属于串联补偿装置，主要适用于电压调节，而统一电能质量控制器属于混合型的补偿装置，三者相比，D-STATCOM 具有功能强大、性能优良、性价比高的明显优势，被认为是用户定制电力的最重要的控制器。



D-STATCOM 的一般拓扑结构图

（a）基于 VSI；（b）基于 CSI

主要类型　按逆变器不同可以分为电压源逆变器型和电流源逆变器型；按控制模式可以分为电流控制模式和电压控制模式；按储能系统可以分为电容储能、电感储能、超级电容储能（S-CES）、超导磁体储能（SMES）、飞轮储能（FES）和电池储能（BES）模式。为提高端电压，D-STATCOM 可以采

用多电平构建，为实现更大的额定容量和更小的 PMW 电流纹波，可以采用多种拓扑结构组合，包括并联结构、级联结构、串联型主从拓扑、并联型主从拓扑。

发展历史和趋势　1976 年美国人 L. Gyugyi 提出了用电力半导体变流器进行无功补偿的各种方案。1980 年日本研制成功 20Mvar 的静止补偿器，1991 年和 1994 年日本和美国分别研制成功了一套 80Mvar 和 100Mvar 的采用 GTO 晶闸管的 STATCOM。STATCOM 原又称新型静止无功补偿装置（ASVG）、静止无功发生器（SVG）等，1995 年国际大电网会议与电力电子工程师学会建议采用静止同步补偿装置（STATCOM）。1999 年，中国第一台 20Mvar STATCOM 在河南电网正式投入电网运行。早期 STATCOM 大多采用 GTO 器件，随着 IGBT、GCT 和 IGCT 等更高频率、更大容量电力电子器件的发展，以及相应的 PWM 控制技术应用到 STATCOM 中，其容量、电压等级、响应速度和控制性能不断提高。用户定制电力技术（custom power）和分布式发电的发展，推动了 STATCOM 在中低压配电网的应用并形成 D-STATCOM。D-STATCOM 的技术研究和应用推广发展迅速，其器件通常采用 IGBT，并研发了多种控制策略和算法，已有大量商业应用。随着电力电子开关器件、电路拓扑结构和控制技术的协同发展，D-STATCOM 的性价比会进一步提高，将成为智能配电网最重要的控制器之一。

参考书目

Strzelecki R，Benysek G，等．智能电网中的电力电子技术．徐政，译．北京：机械工业出版社，2010.

jingzhi wugong buchang zhuangzhi

静止无功补偿装置　(static var compensator，SVC)

由电容器、各种电抗元件及晶闸管等构成，与系统并联并向系统提供或从系统吸收无功功率的装置，简称为静补装置。其静止是相对于发电机、调相机等旋转设备而言的。传统的 SVC 是在机械投切式电容器和电抗器的基础上，采用高压、大容量晶闸管代替机械开关（断路器）而发展起来的，它可以进行投切或连续控制，快速地改变其发出的无功功率，具有较强的无功调节能力，为电力系统（或者负荷）提供动态无功电源，实现多种调节功能。以下分别就 SVC 的主要类型及性能、晶闸管阀组及其冷却系统、静止无功补偿装置滤波系统、控制和保护系统、在电力系统和工业用户的应用以及发展概况等作介绍。

主要类型及性能　传统的 SVC 有多种型式，其输出无功功率的改变，是通过并联电容器、电抗器的投切，或通过改变并联电抗元件的电抗值来达到。按调节方式的不同，SVC 可分为两大类：一类是晶闸管控制型；另一类是磁控型（magnetically controlled reactor，MCR）。而晶闸管控制型又可分为开关控制和相位控制两种方式；磁控型（MCR）有磁阀式（MCR-1）和裂芯式（MCR-2）两种，前者的相控晶闸管直接接在一次绕组中，后者的相控晶闸管通过控制二次绕组的电流改变铁芯饱和度实现调节。另外，尚有两种 SVC：①可控饱和电抗器型静止无功补偿装置（controllable saturated shunt reactor，CSR）；②自饱和电抗器型静止无功补偿装置（saturated shunt reactor，SR）。前者由于动态响应速度慢、噪声大、损耗大，后者由于控制不灵活、需配有载调压变压器、噪声大、损耗大等原因，皆不再使用。几种类型的静止无功补偿装置接线示意如图 1 所示。其中，晶闸管开关控制型的静止无功补偿装置有：晶闸管投切电容器（thyristor switched capacitor，TSC）和晶闸管投切并联电抗器（thyristor switched reactor，TSR）。晶闸管相位控制型包括晶闸管控制电抗器（thyristor controlled reactor，TCR）及晶闸管控制变压器（thyristor controlled transformer，TCT）。由多个 SVC 并联支路构成的系统也称为静止无功补偿系统（static var system，SVS），SVS 的设计是根据工程的需要将不同性能的支路组合而成。

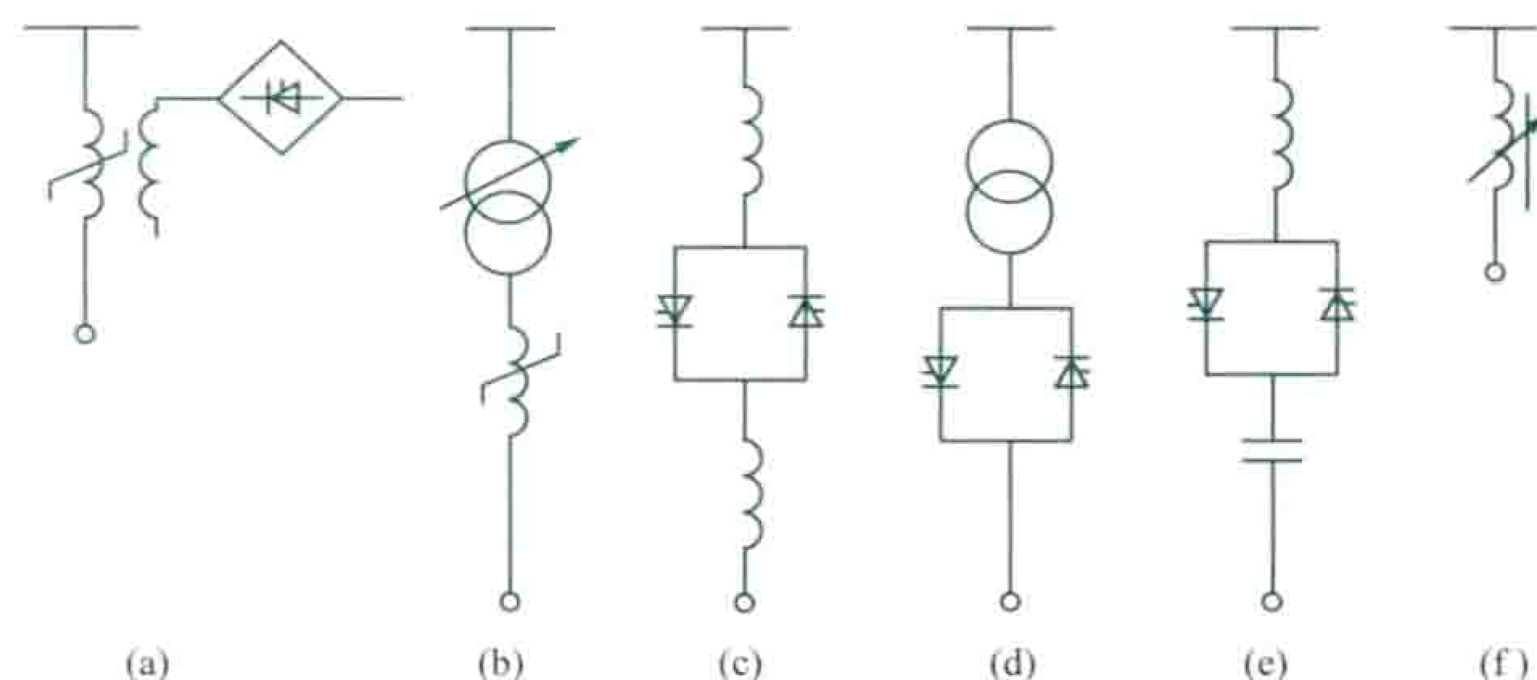


图 1　几种类型的静止无功补偿装置接线示意图
(a) CSR；(b) SR；(c) TCR、TSR；
(d) TCT；(e) TSC；(f) MCR

SVC 的基本特性包括：①输出特性（*U-I* 特性）；②调节的连续性；③响应时间；④控制的灵活性；⑤分相控制能力；⑥产生的谐波；⑦损耗；⑧过负荷能力及耐受电压能力；⑨噪声。常用静止无功补偿装置性能和适用范围比较见表（输出特性均类似，不作为比较项目）。

常用静止无功补偿装置性能和适用范围比较

项目 \ 型式	CSR	SR	MCR-1	MCR-2	TCR	TCT	TSC	TSR
动态响应速度	较慢	很快	较慢	稍快	快	快	快	快
能否连续调节	能	能	能	能	能	能	级差调节	级差调节
过载能力	取决于电抗器设计	短时 3～5 倍，较长期 1.3 倍	取决于电抗器设计	取决于电抗器设计	取决于晶闸管	取决于晶闸管	取决于晶闸管	取决于晶闸管
产生高次谐波情况	有	不大	不大	不大	有	有	无	无
能否增加附加控制	可以	不能	可以	可以	可以	可以	可以	可以
能否分相控制及对三相电压有平衡作用	不能，但有改善作用	不能，但有改善作用	可以	可以，但有局限性	可以	可以，但有局限性	可以，但有局限性	可以，但有局限性

续表

项目 \ 型式	CSR	SR	MCR-1	MCR-2	TCR	TCT	TSC	TSR
是否需要配有载调压变压器	不	需要	不	不	不	不	不	不
噪声（dB）	100 左右	100 左右	约 85	约 85	约 75	约 85	约 60	约 75
损耗（%）	1.5	1.5	1.0	1.0	0.7	1.5	0.3	0.7
对电力系统的适用性	弱	适用于限制过电压	弱	适用	强	已很少用	适用	适用
对工业用户的适用性	适用	适用	适用	不适用	适用	适用，但较少用	适用	不适用
发展动向	应用很少	应用很少	推广应用	超高压输电	应用广泛	改为分级并联投切型	较广泛	超高压输电应用较多

晶闸管阀组及其冷却系统 晶闸管阀的控制方式有相位控制型和开关控制型两种。连接于 6kV 及以上电压等级母线的晶闸管阀，一般由若干串联的阀组件构成，这些阀组件包括晶闸管元件、散热器、均压和保护电路、触发转换和取能电路、阀基电子、阀冷却系统等部分。晶闸管阀冷却系统可将阀产生的热量传递到周围的空气或其他介质中，使晶闸管元件结温在允许范围内。冷却系统有水冷却、油冷却和空气冷却等。容量较大的 SVC 一般采用密闭式水冷方式，容量较小的可以采用高效热管散热器或空气冷却方式。

静止无功补偿装置滤波系统 滤除静止无功补偿装置本身及非线性负荷产生的高次谐波用的滤波系统。常由几组适于谐波源特性的无源滤波器组成，也可由有源滤波器或无源与有源滤波器混合构成。

无源滤波器 由滤波电容器（或符合使用要求的并联电容器）、电抗器和电阻器适当组合而成的滤波器。运行时与谐波源并联，兼作无功电源。无源滤波器的优点是结构简单，运行可靠，维护方便，价格低廉；缺点是材料消耗多、体积大、滤波效果受制于系统条件，易造成谐波放大或过载。较常用的无源滤波器有单调谐滤波器（也称单通滤波器）、二阶高通滤波器、C 型高通滤波器和双调谐滤波器（也称双通带滤波器）四种，其原理接线如图 2 所示。

（1）单调谐滤波器由图 2（a）所示的 LC 串联谐振电路构成（R_0 为 L、C 及连线的等值电阻，数值很小），能将 h 次谐波电流极大部分分流，从而使该次谐波电压大为降低。

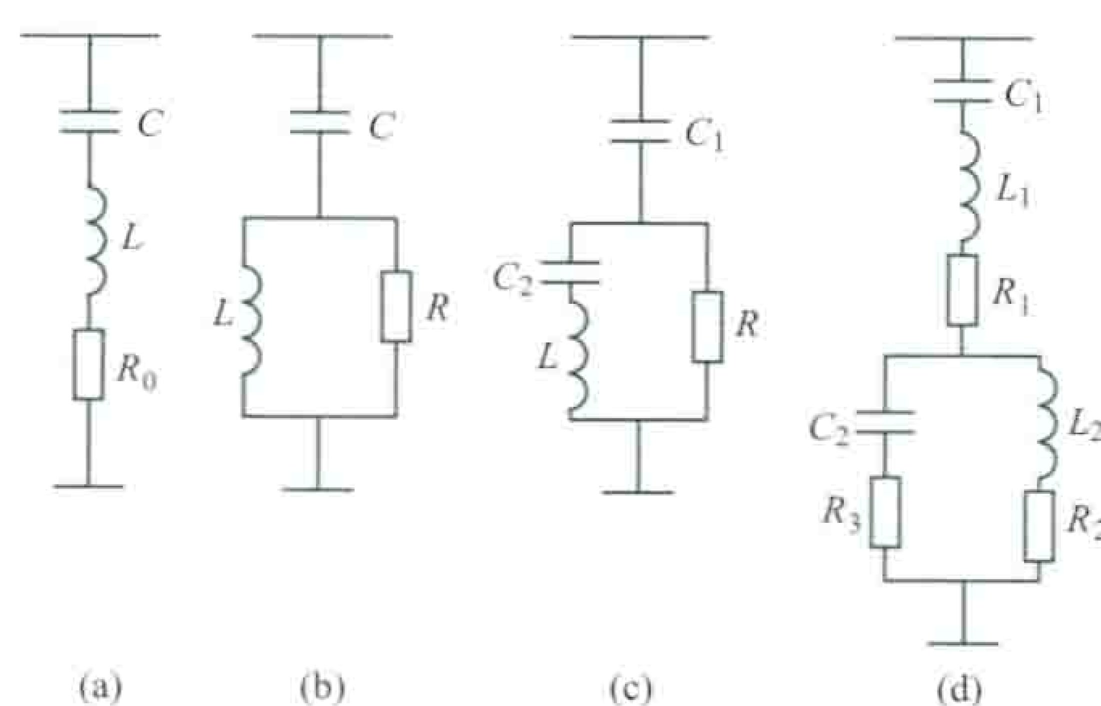


图 2 常用无源滤波器

（a）单调谐滤波器；（b）二阶高通滤波器；（c）C 型高通滤波器；（d）双调谐滤波器

（2）二阶高通滤波器如图 2（b）所示，滤波器阻抗 Z 与频率 f 的关系一般是 $Z = R\{a^2/(1+a^2) - \mathrm{j}/[a(1+a^2)]\}$，其中 $a = f/f_0$，$f_0 = 1/(2\pi CR)$，f_0 称作截止频率。当 $f < f_0$ 时，Z 较大；当 $f < f_0$ 时，Z 明显降低，而且变化不大；当 $f \to \infty$ 时，$Z \to R$。这说明滤波器具有很宽的通频带，可以滤除 $f < f_0$ 的高次滤波。

（3）C 型高通滤波器如图 2（c）所示，与二阶高通滤波器相比，电路中多一个和 L 相串联的 C_2。C_2 的阻抗在谐波次数较高时可以忽略，此时滤波器的性能和二阶高通一样；但 C_2 与 L 对基波串联调谐，故电阻 R 中基波损耗很小。这种滤波器常用于大型冲击性非线性负荷（例如电弧炼钢炉）低次（4 次及以下）谐波滤波。

（4）双调谐滤波器接线如图 2（d）所示，其中 C_1、L_1、R_1 构成串联谐振回路，C_2、L_2、R_2 和 R_3 构成并联谐振回路。这种滤波器可实现两个单调谐滤波器的功能，且基波损耗较小，但结构比较复杂，在高压直流换流站中用得较多。

有源滤波器 利用可关断电力电子器件产生与负荷电流 i_1 中的谐波分量（$i_1 - i_s$）大小相等、相位相反的电流 i_f 来消除电网电流中谐波的滤波器。工作原理如图 3 所示。

控制和保护系统 控制和保护系统用于监控 SVC 的运行状态，由监控屏、调节屏、保护屏等组成。SVC 控制系统按预定的程序使 SVC 起动/停止，按规定顺序投切各支路、调节无功容量输出，保护 SVC 主设备不受损坏，还可通过通信接口与站控和上级控制（或调度中心）保持相互传送信息和运行指令。

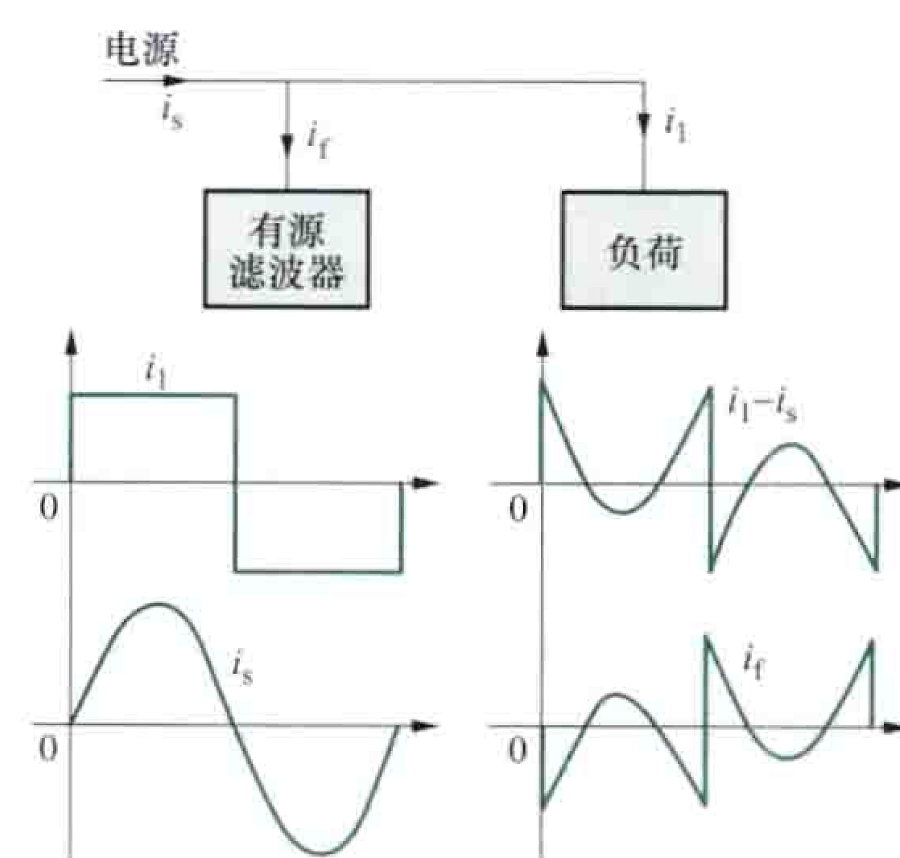


图 3 有源滤波器工作原理

静止无功补偿装置控制系统 TCR、TCT、TSC 及 TSR 型静止无功补偿装置控制系统一般包括阀控和主控两部分。阀控的主要功能为接受来自主控的命令，转换为触发脉冲，将触发脉冲分配到各个晶闸管。主控的功能为获取电流、电压、功率等测量值，根据电力系统运行要求，经运算分析后将输出的命令送给阀控。应用中有可能需要综合一些附加控制功能，以达到抑制系统振荡等特殊的目标。控制方式有开环和闭环两种。开环控制调节速度快，适用于电弧炉、轧机等快速冲击负荷以及其他需要快速响应的场合；闭环控制调节误差小，适用于维持电网节点电压水平等应用。

静止无功补偿装置保护系统 当 SVC 某部件故障或不

正常运行时，为减轻其损坏程度和防止其影响系统安全运行，应具有相应的保护功能，一般包括并联电容器（包括滤波器）保护、并联电抗器保护、晶闸管阀组保护和控制器保护四部分。

（1）并联电容器组保护通常设电容器内部故障保护（包括单台熔断器和内部故障继电保护）、相间短路与过负荷保护（常用带速断的反时限过电流继电器来完成）和过电压与低电压保护。

（2）并联电抗器保护，对于高、中压油浸式并联电抗器通常设瓦斯保护、纵差保护、过电流保护和过负荷保护；干式电抗器通常仅设过电流保护和过负荷保护。对大型重要的干式电抗器加设距离保护，在回路阻抗增大或减少超过规定极限时动作。

（3）晶闸管阀组保护通常设：①过电压保护，包括晶闸管阀组两端出现过电压时使阀组立即导通以防止击穿的过电压保护（如击穿二极管保护）和跨接在每对反并联晶闸管阀上限制暂时过电压的电阻电容保护；②温度保护，包括监测晶闸管触点温度的过热保护和冷却介质温度与流量的连续监测装置；③晶闸管故障监测，通过晶闸管的触发和监测回路，能够监测晶闸管的状态，当发生晶闸管元件击穿时，可通过光纤将信号传送到控制室的指示单元。

（4）控制器保护通常设：①控制器过电压保护，当响应电压与参考电压之差超过整定值，并经一定时延后动作于跳闸；②低电压保护；③控制回路故障保护；④冷却装置故障保护；⑤辅助电源故障保护。

在电力系统和工业用户的应用　在电力系统的应用主要有：①系统电压控制，降低网损；②提高系统静态、动态及暂态稳定性，提高输电能力；③提高系统对功率振荡以及次同步振荡的阻尼；④三相电压的平衡化；⑤降低暂时过电压；⑥高压直流输电换流站的无功功率补偿、滤波和电压控制；⑦采用特殊设计可以构成SVC兼直流融冰装置，在满足正常工况下系统调压和稳定控制的同时，当导线覆冰时，将SVC模式重构为直流融冰模式，产生直流电流加热导线，融化覆冰；⑧设计成可移动式SVC装置（relocatable SVC，RSVC），可以根据电网的不断发展和变化，将RSVC从不需要的位置移动到电网中最能发挥作用的地方，发挥其SVC功能，这可以节约电网建设周期和节省投资，提高SVC利用率。

在工业用户的应用主要有冲击性、非线性或不平衡负荷的无功补偿和电压控制，如轧钢机、矿山绞车、电弧炼钢炉、电焊机、电气机车、频繁起停的大型电动机等。其作用是：①补偿负荷快速变动的无功需求，改善功率因数，降低供电损耗；②稳定母线电压，抑制电压波动和闪变；③滤除高次谐波，减少向系统注入的谐波电流；④降低由于三相负荷不对称引起的三相电压不平衡；⑤改善负荷的工作条件，提高工效和产品质量，降低电耗。

发展概况　20世纪60年代初，英国、比利时等国首先研制出CSR型静止无功补偿装置，之后英国GEC公司研制出SR型静止无功补偿装置，并于1964年应用于有冲击负荷的工业用户，后又将它应用于远距离输电线路的中间变电站，提高线路电压和输电能力，同时应用于输电线路末端，实现调相、调压功能和抑制暂时过电压。20世纪70年代以来，随着电力电子器件制造技术的进步，以晶闸管为主要控制器件的各种静止无功补偿装置有了迅速发展。20世纪90年代，ABB、西门子（Siemens）、阿尔斯通（Alstom）、东芝、三菱等大公司全数字化大容量TCR型SVC进入实用化阶段，装置的可靠性和无功补偿的效果得到提升，TCR在工业领域和输配电领域得到了更广泛的应用。世界上已安装的高压SVC（以TCR为主）总数有1000多套，总容量超过100Gvar，其中用于超高压输电系统的已有200多套，最大容量的一套SVC安装于墨西哥Temascal 400kV变电站，动态调节容量达600Mvar；有超过600套、总容量约达40 Gvar的SVC在工业部门使用。20世纪80年代俄罗斯对CSR型SVC做了改进，推出MCR型SVC（有磁阀式和裂芯式两种型式）。

中国从20世纪80年代初开始了SVC技术的研制开发，SR、TCR、TSC型SVC都得到应用，TCT型SVC也研制了工业样机。90年代初开展了MCR型SVC的研究。1981～1990年中国进口了500kV输电系统用的SVC共有6套，调节容量为105～240Mvar，均采用TCR+TSC或机械投切电容器组方式。2000年前工业应用的SVC主要在钢铁和机械行业用于电弧炉或轧机等冲击负荷无功补偿，容量一般在10～50Mvar，主要采用TCR型SVC，且大部分为国外进口。2001年中国推出了国产化6～35kV TCR型SVC新平台，采用全数字化控制、封闭式循环纯水冷却、综合自动化、光电触发等一系列新技术，并成功地应用到工业用户（交流电弧炉、轧钢机）的无功冲击和电压闪变治理工程及电力系统变电站无功补偿与电压控制中，该技术平台与国外先进技术处于同等水平。2004年9月，中国辽宁省鞍山红旗堡220kV枢纽变电站TCR型输电网SVC（100Mvar、35kV）示范工程投入运行，是中国第一套具有完全自主知识产权应用于输电网领域的SVC装置。现在SVC产品已完全可以立足于中国国内技术，在国外市场也具备相当的竞争力。已有多套SVC装置用在500kV电网的枢纽变电站，最大容量为180Mvar、66kV。在工业上，中国国产SVC最大容量已达200Mvar、35kV（TCR型）。

在中国，宜开发结构紧凑、占地小、损耗小、性能优、可靠性高的各种类型的实用SVC（不限于TCR、TSC和MCR三种型式），以适应不同用户的需要，SVC仍是当前世界上最为通用的动态无功补偿装置。尽管静止同步补偿装置（static synchronous compensation，STATCOM）在构成原理、响应速度、补偿特性、双向调节以及占地面积上均比SVC优越，但其技术成熟度、运行维护等方面仍需不断完善，短时间（约10年）内，在动态无功补偿领域，SVC仍将发挥重要作用。

jumin shenghuo yongdian

居民生活用电　（residential electricity consumption）

居民家庭内生活所消耗电能的行为。居民生活人均用电水平是衡量居民生活现代化水平的重要标志。随着家用电器普及率的提高及现代社会的发展，居民生活用电与人们生活、社会秩序、安全与环境等的关系越来越密切，一旦断电，不仅给广大居民生活造成极大的不便，而且会影响正常的社会公共秩序，必须引起重视。

用电概况　电能的应用开始于电气照明。居民生活用电

（见图1）大致可以分为3个阶段：①第一阶段，主要用于照明和用电量较少的收音机、电视机等小型家用电器。19世纪90年代居民生活用电主要是少数城市家庭生活照明。19世纪末和20世纪初，随着城乡电网的发展，居民生活用电范围迅速扩大，一些国家和地区的部分家庭开始使用广播收音机、电视机、电风扇、洗衣机、电冰箱等并逐步扩大应用范围。20世纪中叶以后，即使是新发展的供电地区，耗电较少的家用电器几乎同时与照明进入居民家庭。②第二阶段，电冰箱、彩色电视机等家用电器快速普及，生活炊具、夏季防暑降温、冬季采暖等生活需求的能源供给逐步发展成以电能为主后，用于居民生活的年用电量迅速提升。③第三阶段，随着社会的不断进步、居民收入的增加、生活水平和居住环境的改善，人们的消费观念和生活习惯逐步向追求品质，选择健康、环保、舒适、观赏的用品转变，电炊器具、电冰箱、微波炉等厨房器具，电暖炉、电风扇、多功能空调机、暖风机等冷暖设备，电热水器、洗衣机、清洁除尘器具、消毒器具、干衣熨烫器具、美容器具、健身器材或设施等卫生保健设备，电视机、音响设备、家庭影院等文化娱乐设备，越来越普遍应用于居民家庭生活。信息时代的到来，个人电脑、传真机、打印机、复印机、数码技术、互联网等技术和产品迅速进入居民家庭生活，并逐步向家庭生活智能化迈进，居民生活的年用电量得到了更加快速增长。



图1　居民生活用电

在一个国家或地区内，由于社会及经济发展的不平衡，居民的收入差别、地区供能结构的不同，使得居民家庭用电水平也各异，城乡之间、地区之间人均差异很大。2011年，美国人均生活用电量为4560kW·h；日本人均生活用电量为2270kW·h。在中国，1949年，全社会用电量为34.6亿kW·h，用于居民生活的用电量按全国人口平均，仅为0.52kW·h；随着社会进步和居民生活水平的提高，1990年，居民生活的用电量按全国人口平均为40kW·h，其中城镇人均生活用电量为88.4kW·h，农村人均生活用电量为23.1kW·h；2011年，居民生活用电量达5620亿kW·h，占全社会用电量的比重为11.95%，按全国人口平均为418kW·h，其中城镇人均生活用电量为470.7kW·h，农村人均生活用电量为364.3kW·h。这一水平与世界发达国家的差距依然较大，美国2011年人均生活用电量是中国的10倍。2012年，中国还有约387万无电人口。图2所示为1980～2012年中国居民生活用电量。

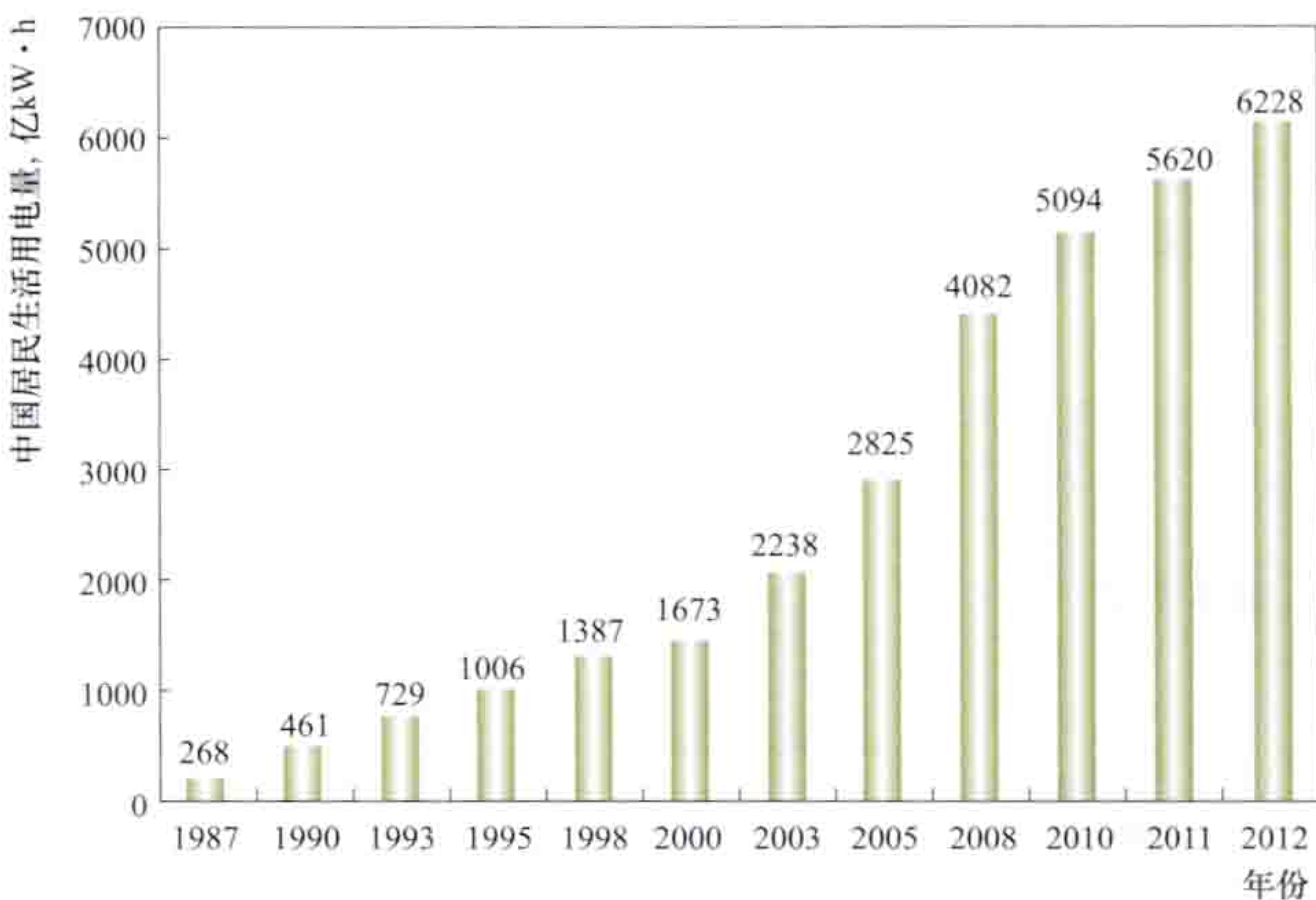


图2　1980～2012年中国居民生活用电量

用电特点　居民生活的用电特性已由照明负荷为主转为以电冰箱、电炊具、空调等负荷为主，其构成主要是基本负荷与季节性负荷两部分。基本负荷主要是照明及冰箱、电视机、洗衣机等满足基本生活需求的负荷，季节性负荷主要是夏季降温负荷和冬季取暖负荷等。其用电特点：①基本负荷的用电特性比较平稳，不随气温发生变化。如电冰箱负荷分布均匀，照明、电视机、电脑、洗衣机等的使用时间集中在晚间，负荷分布也比较均匀。②季节性负荷对气候的敏感度高，对电网负荷特性影响大。夏季的降温负荷和冬季的取暖负荷与气候有很大关系，是居民生活用电中比重变化最大且最不稳定的负荷。另外，这些负荷的开启同时率高度一致，尤其是在高温、严寒、双休日、寒暑假期间，表现得较为明显，使电网负荷峰值加大。一般来说，当夏季室内温度超过26℃、冬季室内温度低于12℃时，用电负荷就会随气温有明显变化，且由此增加的负荷约占社会负荷增量的1/3，在全电网的最高负荷中起决定性的影响。③电感性负荷比重大，用电功率因数低。家用电器基本上都是单相负荷，造成负荷不对称；由于家用电器中的整流、变频等设备日益增多，这些设备向电网注入谐波，会给电网的电能质量带来污染。

对供电的要求　保障居民生活用电是构建和谐社会的重要组成部分，也是供电企业的社会责任。根据居民生活的重要性及其用电特性，供电时需特别考虑：①优先保证居民生活用电。当电网发生供需矛盾时，要以保民生为首位。②有合格的电能质量，不因供电问题影响家用电器的正常使用。③保证用电安全。居民家庭内的照明电源和动力电源应分路配置，并安装漏电保护器等。

jubu zhaoming

局部照明　(local lighting)　特定视觉工作用的，为照亮某个局部而设置的照明（见照明分类）。国际照明委员会（CIE）建议下列情况使用局部照明：①与很费眼睛的作业有关的工作，特别是仅在有限范围需要增加照明的地方；②需要很强的指向性灯光来辨认物体的形状和质地时；③因为遮挡，一般照明照不到的地方；④视力下降需要较高照度时；⑤必须补偿由于一般照明造成的对比减弱时。

按一般室内照明规定，不允许在工作面上只设局部照明。这对安全和视觉疲劳等均会产生不利影响。中国国家标准规定，工厂内使用局部照明时，混合照明中的一般照明的照度值应按该等级混合照明照度的5%～15%选取，不宜低于20lx，以保证照明质量。

局部照明灯的形式很多，如机床灯、地面上可移动的支架灯、无棚墙壁上安装的直接型照明灯、独立安装的投光灯、嵌入顶内的筒形投射灯、展示画面照明的移动导轨投光灯等。

检验用工作照明是一种典型而又特殊的局部照明，它主要用来检查制品的缺陷、颜色的均匀性、光泽的均匀性、弯度、污点、异物、裂纹等产品质量。表中所示为几种检验作业局部照明的基本形式。

检验作业局部照明的基本形式

基本形式					
光　源	置于被检物上方	置于被检物前方	置于被检物前下方	漫射性面光源	漫透射面光源
漫射型灯具	光泽平面上的凹凸、弯曲（金属、塑料板等）	半光泽面上的亮斑、凹凸（铅字、活板等）	强调平面上的凹凸（布、丝织物的纺织不匀，疵点，起毛等）	光泽面上的一致性、瑕疵（金属、玻璃等）光泽面的翘曲，凹凸由反射像的变形来观察光源面上的条纹、格子的直线样子	透明体内的异物、裂痕、气泡（玻璃、液体等）半透明体的异物、不均匀（布、棉、塑料等）。
集光型灯具	光泽面的瑕疵、划线、冲孔、雕刻等	粗面上的光泽部分（金属磨损部、涂料的剥落等）	强调平面上的凹凸（板材、铅字、纸板等的翘曲、凹凸）		对于带有白色的异物，要用黑色背景，以聚光性灯具照射

juzhen bianhuanqi bianpin tiaosu

矩阵变换器变频调速　（variable frequency AC motor speed control by matrix converter）　采用矩阵变换器作为变频器实现交流电动机变频调速的技术。矩阵变换器的概念最早于1976年提出，20世纪90年代末其技术趋于成熟。作为一种交流-交流直接电力电子变流器，其性能优于采用晶闸管的传统交流-交流变频器，而与交流-直流-交流电压型PWM变频器（见交流-直流-交流电压型变频调速）相接近，但矩阵变换器省去了中间直流环节，可实现能量向电网回馈。图1所示为矩阵变换器外观。



图1　矩阵变换器外观

基本原理　用于交流电动机调速的三相-三相交流矩阵变换器包括3×3共9个双向开关 S_{ij}（i＝A，B，C；j＝a，b，c），每个双向开关都具有双向导通和双向关断的能力，如图2所示。

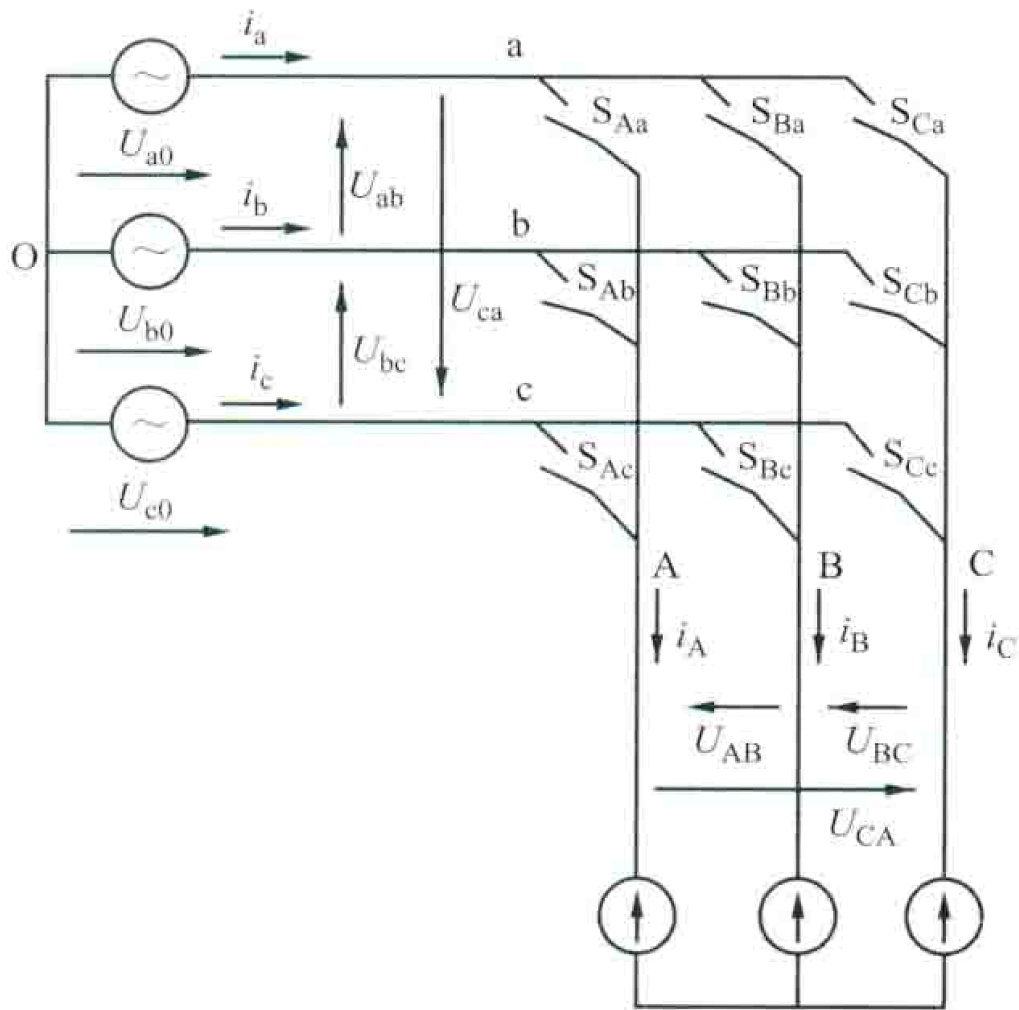


图2　三相-三相交流矩阵变换器电路

矩阵变换器在理论上可以等效为一个“虚拟整流器”和“虚拟逆变器”的级联电路模型，如图3所示。

根据矩阵变换器的等效电路模型，可将空间矢量脉宽调制（PWM）技术分别应用到“虚拟整流器”和“虚拟逆变器”上，再将两个调制过程结合起来，即可实现对整个矩阵变换器的调制。在“虚拟整流器”上实现输入电流空间矢量脉宽调制，可控制矩阵变换器的输入电流波形为正弦，且输入侧功率因数为1；在“虚拟逆变器”上实现输出电压空间矢量脉宽调制，可控制矩阵变换器输出幅值和频率均可调的电压，其功能与PWM逆变器接近。因此，采用矩阵变换器作为交流电动机的供电电源，其频率可以调节，从而实现交流电动机的调速。

控制系统　矩阵变换器可以驱动感应电动机，也可以驱动永磁同步电动机。由矩阵变换器驱动的交流电动机调速系统，可采用恒电压频率比运行方式，也可采用矢量控制、直接转矩控制等高性能交流调速技术。矩阵变换器-感应电动机矢量控制系统是一种最典型的矩阵变换器变频调速系统，如图3所示。为了实现基于矩阵变换器的感应电动机矢量控制，必须将矩阵变换器中“虚拟逆变器”的输出电压空间矢量脉宽调制和感应电动机的转子磁场定向矢量控制结合，构成一个统一的组合控制策略。

如图4所示，组合控制策略中包含了感应电动机的转子磁场定向矢量控制部分（见交流电动机矢量控制）。由转子磁场定向矢量控制得到感应电动机定子电压给定值在两相静止坐标系（αβ轴坐标系）下的α轴分量 U_α^* 和β轴分量 U_β^*；由 U_α^*

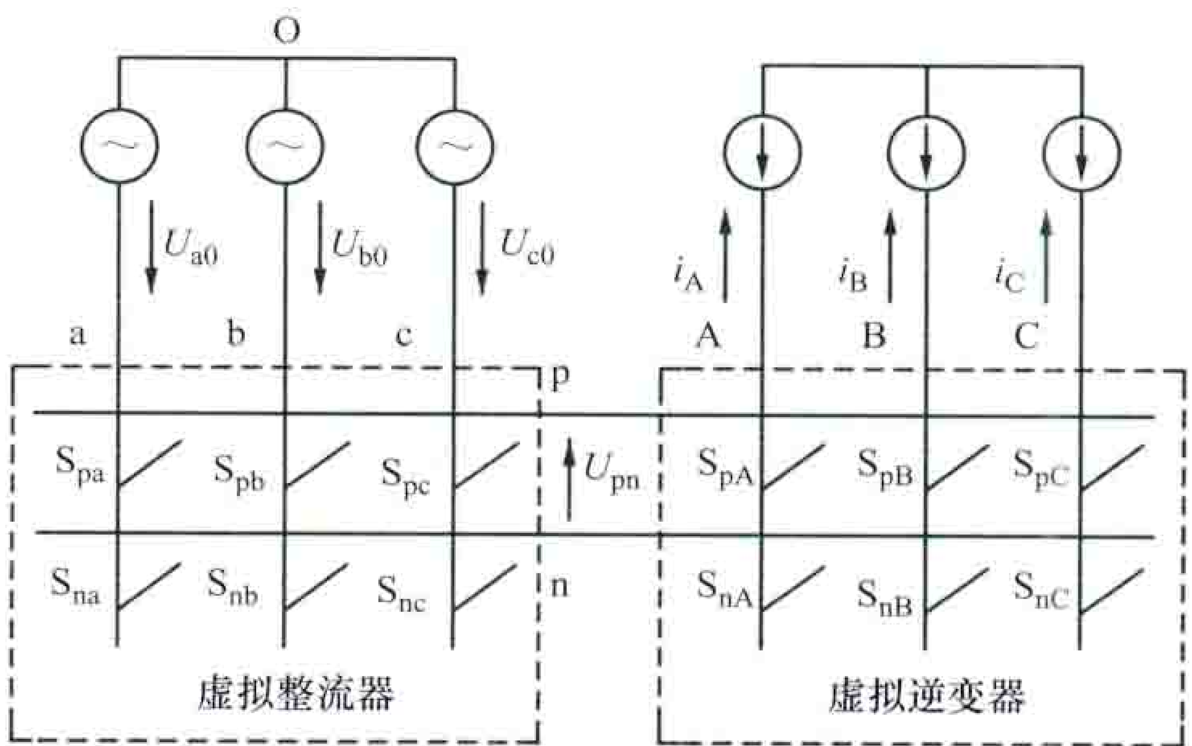


图3　矩阵变换器等效电路模型
p—正极；n—负极

和 U_{β}^{*} 可合成得到矩阵变换器中虚拟逆变器空间矢量调制算法所需的输出电压空间矢量参考值 $\boldsymbol{U}_{oL}$，如图 5 所示。因此，通过“虚拟逆变器”的输出电压空间矢量脉宽调制和“虚拟整流器”的输入电流空间矢量脉宽调制，可以得到矩阵变换器的开关驱动信号，驱动开关器件通断，从而产生感应电动机矢量控制所需的定子电压。

图 4　矩阵变换器-感应电动机矢量控制系统框图

图 5　感应电动机定子电压（矩阵变换器输出电压）空间矢量合成

特点及应用　特点：①输出电压、频率可调，既可实现恒定的电压频率比等简单的变频调速运行，也可与矢量控制相结合，实现对交流电动机磁链与转速精确的解耦控制，从而获得良好的动静态调速性能；②输入侧电流谐波含量少，功率因数高，对电网电能质量影响小；③能量双向流通，电动机制动时可将能量方便地回馈至电网，有利于节能。

矩阵变换器变频调速系统主要用于电梯驱动器、飞机侧翼作动器传动系统、车辆主传动系统等。

参考书目

孙凯，周大宁，梅杨．矩阵式变换器技术及其应用．北京：机械工业出版社，2007.

julüyixi dianlan

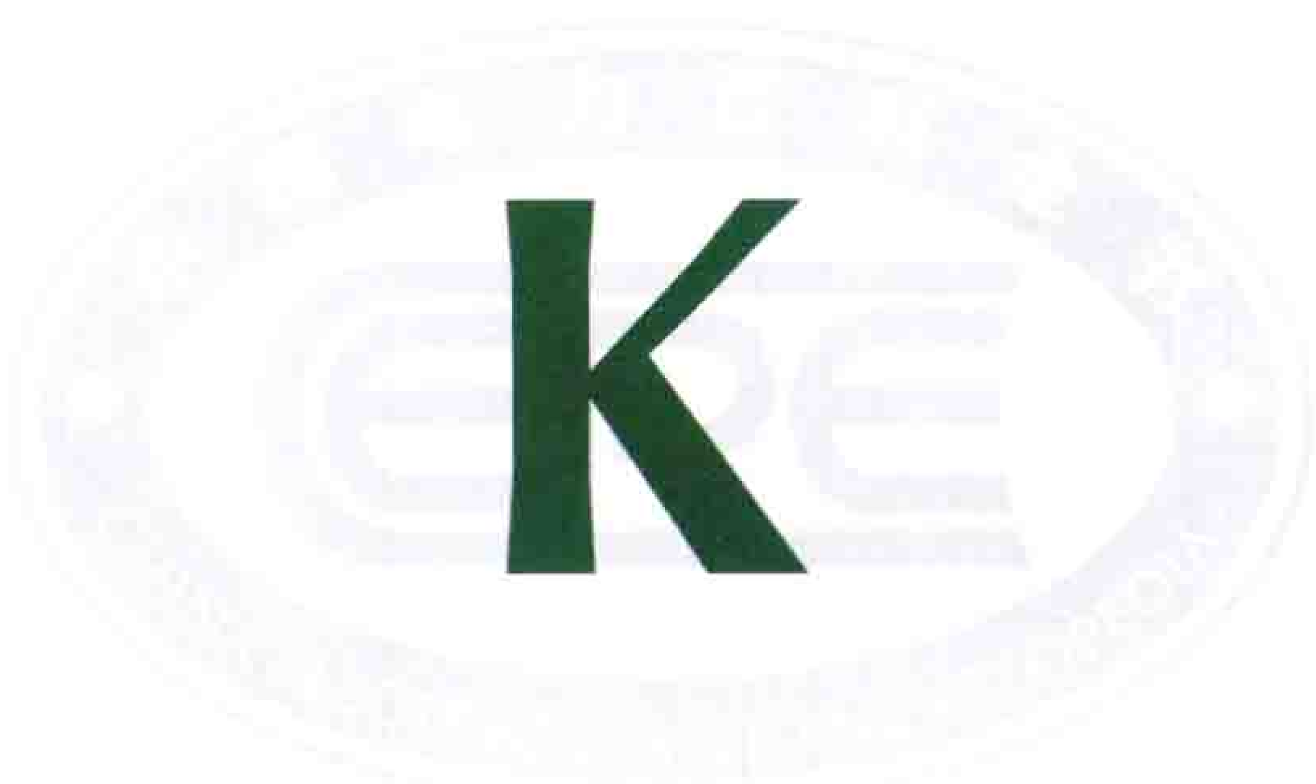
聚氯乙烯电缆　(polyvinyl chloride insulated cable)

用聚氯乙烯聚合材料作为绝缘和护套的一种挤包绝缘电缆（见配电电力电缆），简称 PVC 电缆。主要用于电压在 6kV 级及以下的电力电缆线路中。

聚氯乙烯具有较高的化学稳定性，即耐油、耐酸、耐碱、耐腐蚀，并属非延燃性材料。用聚氯乙烯作为电缆绝缘，价格比其他绝缘低廉，敷设运行简便，接头和终端简单，受潮气影响小，因此适用性广。它的缺点是耐热性能差，一旦燃烧，会释放出氯气，不但对人体有害，且游离的氯原子会与氢结合形成盐酸，严重腐蚀邻近其他电气设备。在安全要求较高的场所，通常要将聚氯乙烯电缆穿在管子中。

由于聚氯乙烯的介质损耗较大，因此很少制成电压高于 6kV 的聚氯乙烯电缆。但聚氯乙烯的抗电离性能较好。聚氯乙烯属于热塑性高分子材料，温度较高时呈塑性，温度较低时呈脆性，因此规定聚氯乙烯电缆的长期允许工作温度不超过 70℃，短路时的导体最高温度不超过 160℃。

在第二次世界大战末期，聚氯乙烯就取代了橡胶作为电缆的绝缘，在 20 世纪 50 年代后期欧洲开始使用。由于聚氯乙烯电缆在火灾时会释放出大量的卤素，使人员窒息死亡，因此聚氯乙烯电缆的使用受到了限制，仅在较低电压范围内使用。



kaibisuo

开闭所 (switching substation) 不配置配电变压器的配电所，又称开关站。它是变电站母线的延伸，以满足城区、开发区等特定地区中压配电的需要，用于解决变电站出线走廊受限、转供负荷不灵活等问题，实现转供负荷、提高供电可靠性及改善供电质量等目标。开闭所(见图1)一般由高压开关柜或环网开关柜以及二次继电保护、通信、自动化等装置构成。此外，还可能装设并联电容器等设备。



图1 开闭所

开闭所的接线一般采用单母线分段接线，两回进线，以提高供电可靠性和灵活性。中压馈线一般采用断路器馈出配置继电保护(见配电所)，或采用负荷开关馈出配置熔断器保护，如图2所示。

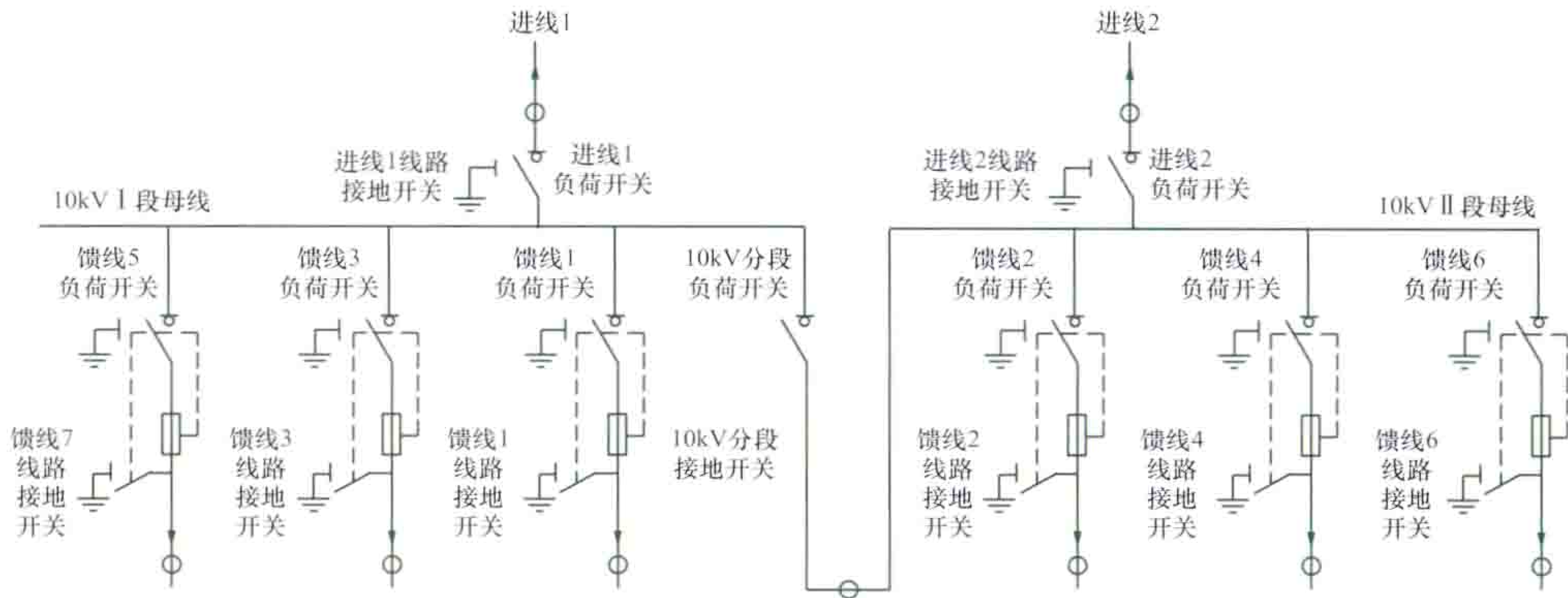


图2 中压进出线采用负荷开关的开闭所典型接线图

kaiguan cizu diandongji

开关磁阻电动机 (switched reluctance motor) 采用定、转子凸极结构且极数相接近的大步距磁阻式步进电动机的结构，利用转子位置传感器(又称位置检测器)通过电子功率开关控制各相绕组导通使之运行的控制电机。与一般开环控制的磁阻式步进电动机不同的是，开关磁阻电动机必须有位置传感器，以保证定子绕组通电状态与转子位置间有严格的同步关系。

结构与原理 开关磁阻电动机典型结构如图1所示。转子上既无绕组也无永磁体，定子磁极上放置集中线圈，径向相对的两个磁极上的线圈串联构成一相绕组，并使两个磁极极性相反。工作时，各相定子绕组按要求通以单向脉冲电流。开关磁阻电动机按照磁通总要沿磁阻最小的路径闭合这一原理工作。在如图1所示的转子位置时，如果给C相绕组通电，则转子将向磁阻变小的方向转动，在图中为逆时针方向。当磁阻达到最小时，即转子4、2极分别与定子C、C′磁极对齐时，将C相绕组断电，然后给B相绕组通电，转子就可连续旋转。可见，开关磁阻电动机实质上是一种大步距磁阻式步进电动机。

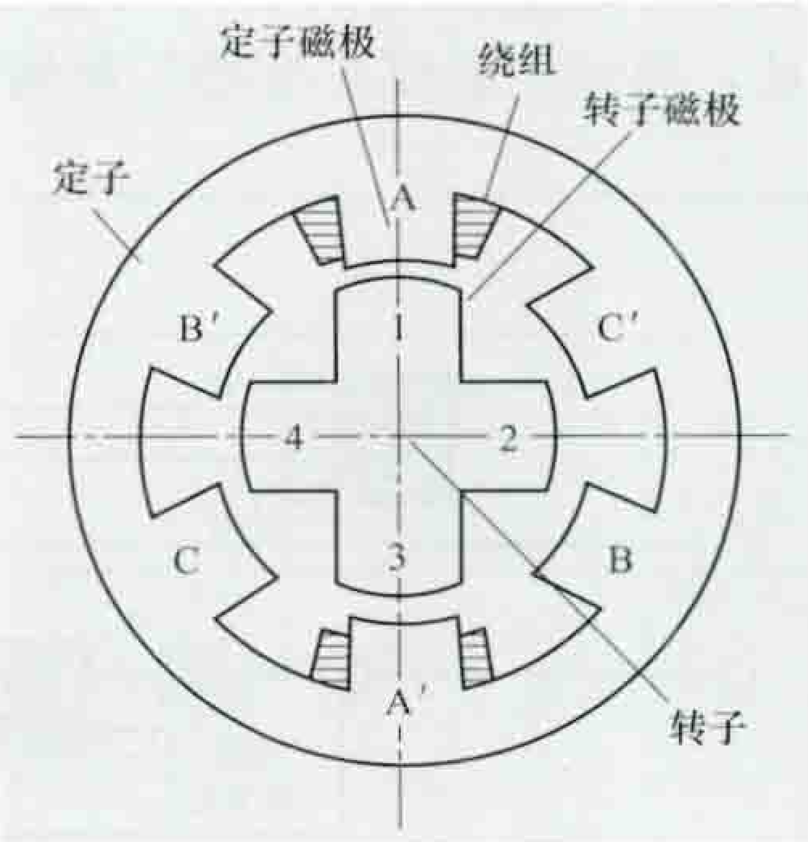


图1 开关磁阻电动机典型结构示意图(6/4极)

开关磁阻电动机的定子极数 p_s、转子极数 p_r 和相数 m 之间通常满足 $p_s=2m=p_r\pm2$ 的关系。相数 m 一般为3或4，定、转子极数配合为6/4、8/6。

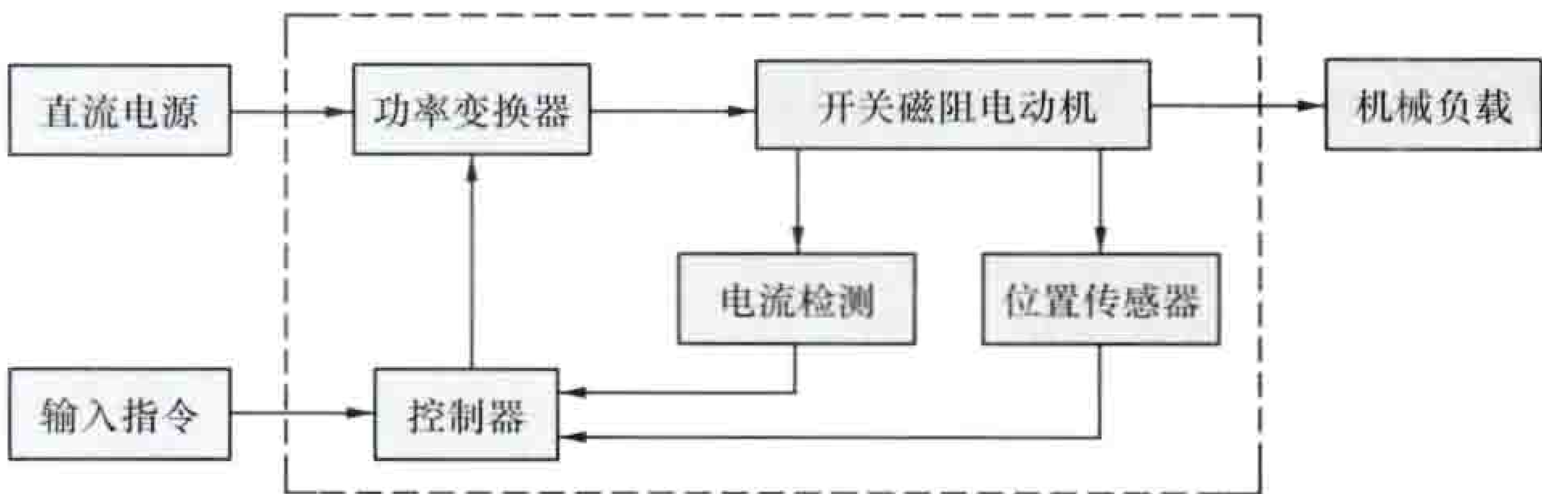


图2 开关磁阻电动机驱动系统基本构成框图

驱动系统 开关磁阻电动机是一种调速电动机，与功率变换器、控制器、电流检测环节及位置传感器构成开关磁阻电动机驱动系统(SRD)，如图2中虚线框所示。位置传感器向控制器提供转子位置信号，控制器根据转子位置及电动机转速、电流的反馈信息，控制功率变换器中功率半导体开关器件的通、断，使相应的相绕组通电或断电。20世纪90年代以来，人们也在研究无位置传感器的开关磁阻电动机控制，已有一些方案获得应用。

控制方法和机械特性 在绕组电感随转子位置角增大时，绕组通以电流将产生拖动转矩，而在绕组电感随转子位置角减小时，绕组通以电流则产生制动转矩。绕组通电、断电时

的定、转子相对位置角分别称为开通角、关断角。开关磁阻电动机运行控制的关键是对开通角、关断角及相电流峰值的控制。在低速运行时，通常采用电流斩波控制，此时开通角和关断角固定不变，通过脉宽调制方法控制通电相绕组的电压有效作用时间，达到限制电流峰值、实现恒转矩调速的目的。在转速较高时，通常采用角度位置控制，通过改变开通角和关断角来改变相电流波形，使转矩随转速成反比变化，实现恒功率调速。当开通角和关断角调节到极限时，转矩将与转速的二次方成反比，呈串励直流电动机的特性。按以上控制方法可得出开关磁阻电动机驱动系统的典型机械特性，如图 3 所示。图中，n_1 是获得最大转矩输出的最高转速，称为第一临界转速；n_2 是获得最大功率输出的最高转速，称为第二临界转速。采用控制变量（开通角、关断角、电压）的不同组合，可以得出 n_1、n_2 的不同分布，从而获得不同的机械特性。

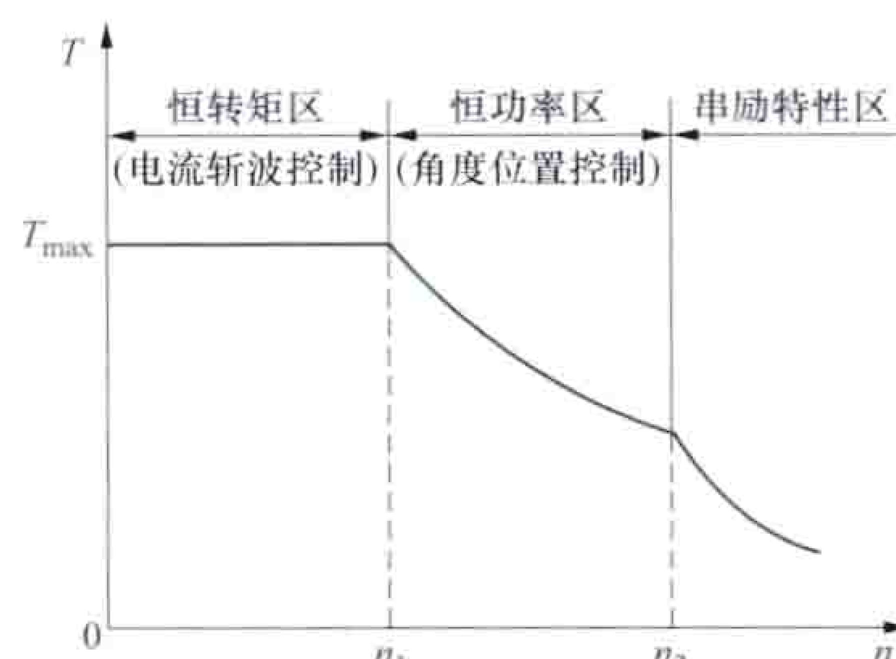


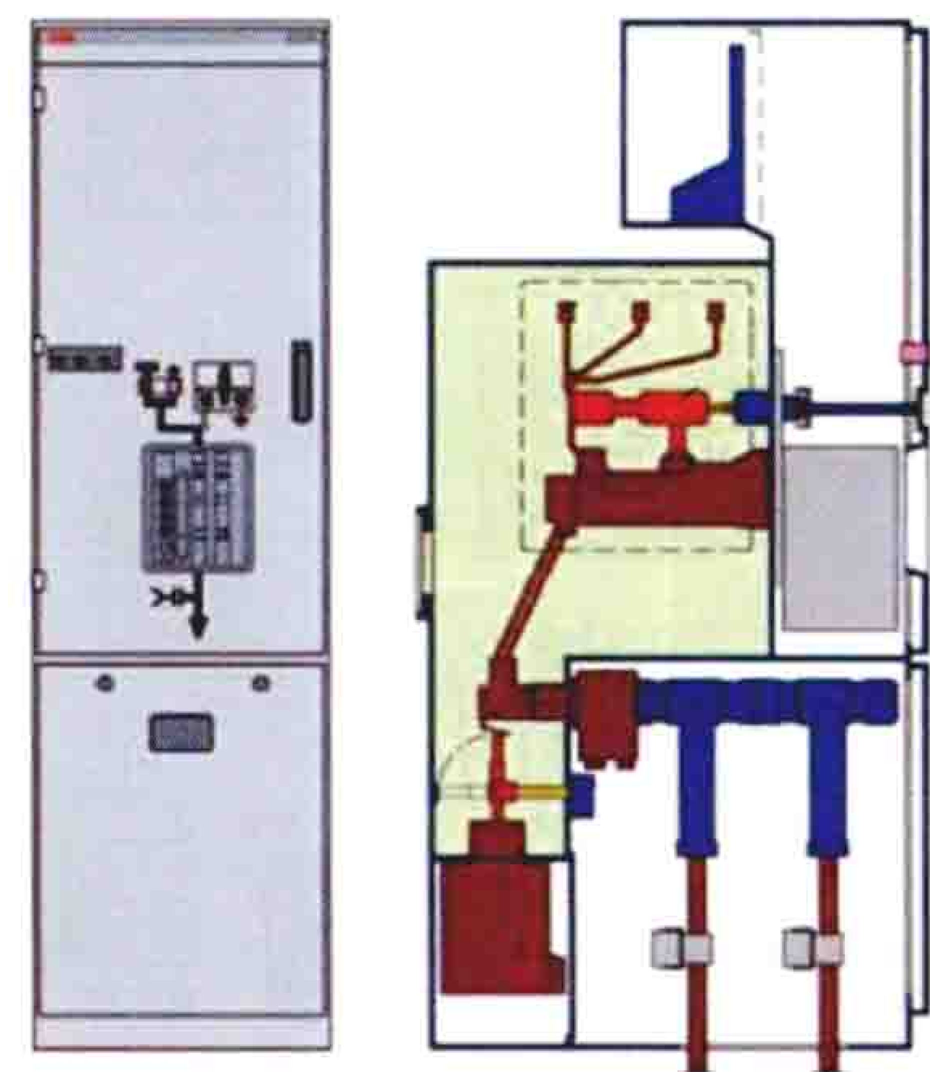
图 3 开关磁阻电动机驱动系统典型机械特性

特点 主要优点：①结构简单、坚固耐用，适合于高速运行；②转矩与电流大小有关，而与电流方向无关，因此绕组只需单方向通电，使功率变换器及其控制简单，成本低，可靠性高；③可以通过对开通角、关断角及电流峰值的控制，得出不同的机械特性，还可较容易地实现四象限运行，因此可以满足多种驱动场合的不同需要；④在较宽的调速范围和功率范围内具有很高的效率。主要缺点：低速时转矩脉动及转速波动较大；振动和噪声大。

kaiguangui

开关柜 (switchgear cubicle)

按电气主接线的要求，以开关设备为主，将断路器、负荷开关、高压熔断器、隔离开关、互感器、避雷器、套管、母线、电缆终端等电气元件，成套布置在一个或几个金属柜内的配电装置。柜内还可装设控制、测量、保护和调节装置。柜内以空气、气体或复合绝缘作为介质。主要用于配电系统接受和分配电能，并能保护电源、隔离故障点和计量用电量。开关柜的优点是占地少，结构紧凑，安装使用方便，经济实用，整齐美观，适用于工厂批量生产。


图 1 充气式绝缘高压开关柜

开关柜有多种分类方法。按内装断路器的型式不同，可分为少油型、真空型和六氟化硫型；按安装方式不同，可分为固定式和移开式（手车式或抽屉式）；按柜体结构不同，可分为敞开式、半封闭式和封闭式（包括金属铠装式、间隔式和箱式）；按使用环境不同，可分为一般环境式和特殊环境式（包括矿山、船舶、化工、湿热带和高寒地区等）；按安装位置不同，可分为户内式（包括考虑凝露型和不考虑凝露型）和户外式。

开关柜通常要求具有以下性能：①柜体结构有足够的机械强度，能防止事故蔓延扩大。②在高压一次侧主回路不停电的情况下，能安全地检修二次侧设备。③操作一次侧开关设备时，二次侧继电保护等元件不会误动。④具有机械或电气的闭锁装置，以防止误分、合断路器，防止带负荷分、合隔离开关或插头，防止带电挂地线或合接地开关，防止误入带电间隔，防止带地线或接地开关在合闸位置时合断路器等，并具有紧急处理的解锁装置。⑤机械闭锁的开关柜，能保证断路器分、合闸速度及触头行程不受影响。


图 2 KYN28 馈线柜

中国于 20 世纪 50 年代初开始生产固定敞开式开关柜；60 年代开始生产移开式开关柜。到 80 年代初，固定敞开式开关柜因绝缘可靠而继续采用，并改进为半封闭式开关柜，与移开式开关柜并存。90 年代，半封闭式发展为封闭式并广泛使用。同时，世界各国已开始生产环网开关柜和充有气体的绝缘高压开关柜（见图 1），以及可以是强电或弱电的总线进来线后再分配到各个终端的馈线柜（见图 2），还有将高、低压开关柜与变压器装在一起发展成箱式变电站。

keni lengzhaji diankong xitong

可逆冷轧机电控系统 (electric drive control system for reversible cold-rolling mill)

用以实现可逆冷轧机正常运转的电力拖动和控制等电路组合的总体。冷轧机可分为连续式和可逆式两大类。连续冷轧机一般用来轧制厚度在 0.25mm 以上带钢，其特点是轧制速度高（35～37m/s）、生产率高，但设备投资大。可逆冷轧机用于轧制 0.5mm 至5～20μm 厚度不同的多品种带钢、不锈钢及各种特殊的有色金属带材。其特点是容量、轧制速度及轧制材料多种多样，从而要求电控系统的性能也不同。其设备比较紧凑，灵活性和通用性比连续式轧机强，设备投资较小，但轧制产量不大。其轧制材料有钢、铜、硅钢、金、铂等，所轧带钢品种规格多，截面均匀，尺寸精度高，表面光洁，机械加工性能好。

根据可逆冷轧机内组装轧辊数目配置方式，轧机可分为二辊式、四辊式及多辊式（6～20 辊）。典型的可逆冷轧机由 1 台四辊机架、左右 2 台卷取机和 1 台开卷机组成，如图 1 所示。每轧完一个道次，要减小辊缝并改变轧制方向，通常需经过 3～5 道次才轧成所需厚度。可逆冷轧机轧制工艺对其电控系统要求高。为适应不同品种、不同道次、对轧制速度的不同要求，电控系统应使可逆冷轧机机架和卷取机具有一定调速范围（1∶30）。为了保证产品质量，要求带张力轧制，而且在稳速轧制和起动、制动过程中始终维持张力恒定不变，同时还要求能单独向不同方向低速运动（冲动状态）。

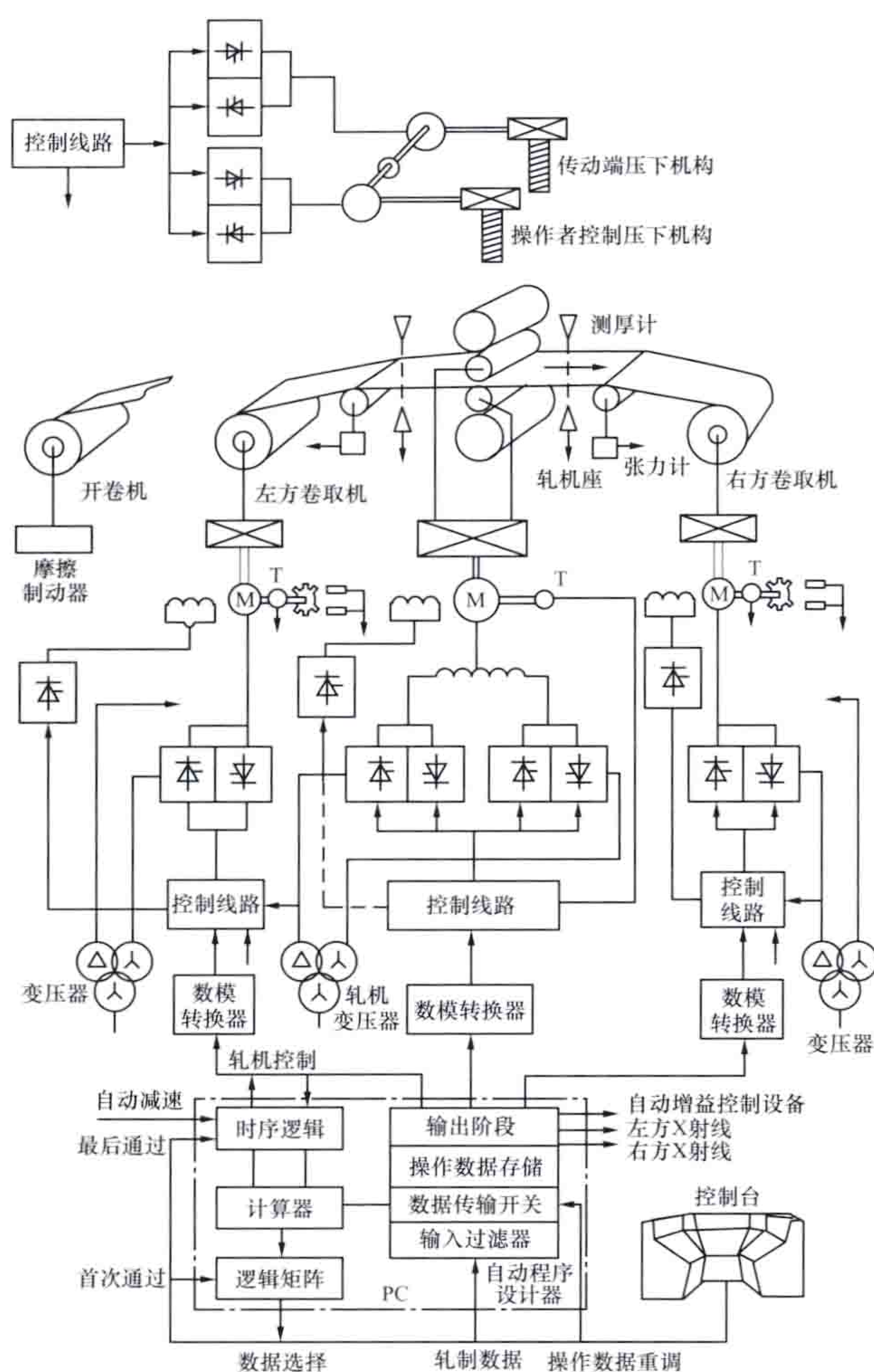


图 1　四辊可逆冷轧机电控系统框图

可逆冷轧机电控系统包括主机速度控制、卷取机的张力控制和压下螺丝的控制及其他自动装置。

主机速度控制　可逆冷轧机生产的前几道次轧制和后几道次轧制所需轧制力矩相差很大。一般初始道次压下量大、速度低、轧制力矩大，后面几道次压下量小、速度高、轧制力矩小。电动机具有恒功率负载特性，再加上考虑到一台轧机不只生产一种带钢，随着宽度和带钢材料变化，所需最大力矩和最小力矩会相差更大，所以主机几乎全部采用他励直流电动机传动。其控制方式采用非独立控制调压调磁直流调速（见直流电动机调压调磁调速）方法，电动机弱磁范围一般在 2 倍以上。在传动方式上，有把上下辊机械地结合在一根轴上的集体传动和每个轧辊分别传动的单独传动两种方式。在单独传动方式中，上下辊有各自独立的速度控制系统。当金属被轧成带材时，轧辊间隙被带材填满，因而上下辊被耦合在一起，变为刚性整体。为了使上下辊传动电动机负荷均衡，需进行负荷平衡调节，其方式是将一个速度微调信号加入其中一个传动系统，以确保上下辊负荷平均分配。

为了提高轧机生产率和成品率，主机必须在 10～15s 的短时间内以恒定的加速度加速到最高轧制速度，同时与开卷机和卷取机同步协调，从而要求主机的速度控制有宽的调速范围和较高的静、动态性能。控制主回路一般采用发电机-电动机组或者晶闸管变流器供电回路。由于可逆轧机轧制方向的变换是在轧机静止状态下进行的，有足够的操作间歇时间用以变换轧制方向，使主回路可以采用电枢可逆系统，也可采用磁场反向系统。小型可逆冷轧机基本上采用晶闸管变流器供电的电枢可逆系统，励磁控制基本上采用晶闸管三相桥式供电方式。为了加快励磁电流变化速度，采用强行励磁，强励倍数一般为 1～2。

主机除采用恒定加/减速度控制方式外，还配有自动减速和轧制方向选择。

卷取机的张力控制　在整个轧机内张力控制需加以协调，才可以在主机机座内产生正确的入端和出端张力，以确保带材厚度均匀和生产出合格的带卷。卷取机控制系统由张力调节和速度调节组成。正常卷取过程为张力调节，冲动、穿带和断带时自动转为速度控制。张力调节综合考虑由卷径变化引起的速度、卷重、转动惯量、机械损失以及加减速过程中引起的动态力矩的变化。其中关键是准确计算卷径大小。大型可逆冷轧机均采用最大力矩法，让电枢电流随卷径与磁通之比变化，张力可维持不变，磁通可任意选定，电动机可得到充分利用。在张力控制系统中，可直接采用张力检测装置——张力计，构成直接张力闭环控制系统，以提高张力控制的准确性。

开卷机与主机一样需进行自动减速控制，并有断带限速保护环节，这对可逆冷轧机是至关重要的。

压下螺丝的控制　压下传动方式有电动方式和液压方式，以液压方式居多。同时采用厚度自动控制，它是靠在主机架入口和出口侧安装 X 射线测厚计实测板厚与所需板厚之差，来控制压下丝杠。

其他自动装置　除上述控制系统外，在可逆冷轧机中还采用许多自动运转装置，如轧机速度和辊缝自动设定、轧机的自动减速和停车、开卷机上料自动高度和宽度对中、钢卷直径计算装置等。它们均是利用各种检测器测出带卷位置，加以计算，然后进行控制。上述自动化装置也可采用可编程序控制器或微型计算机来实现。图 2 所示为计算机控制的四辊可逆冷轧机电控系统框图。它将可逆冷轧机的轧制工艺过程进行程序编制，将每道次的轧制参数输入计算机，这些数据以数字方式存储，变换器将数字量转为模拟量加入控制系统。典型程序编制数据有轧制速度、带钢张力、厚度轧辊间隙、轧制压力极限及卷径计算和自动减速点的计算等。

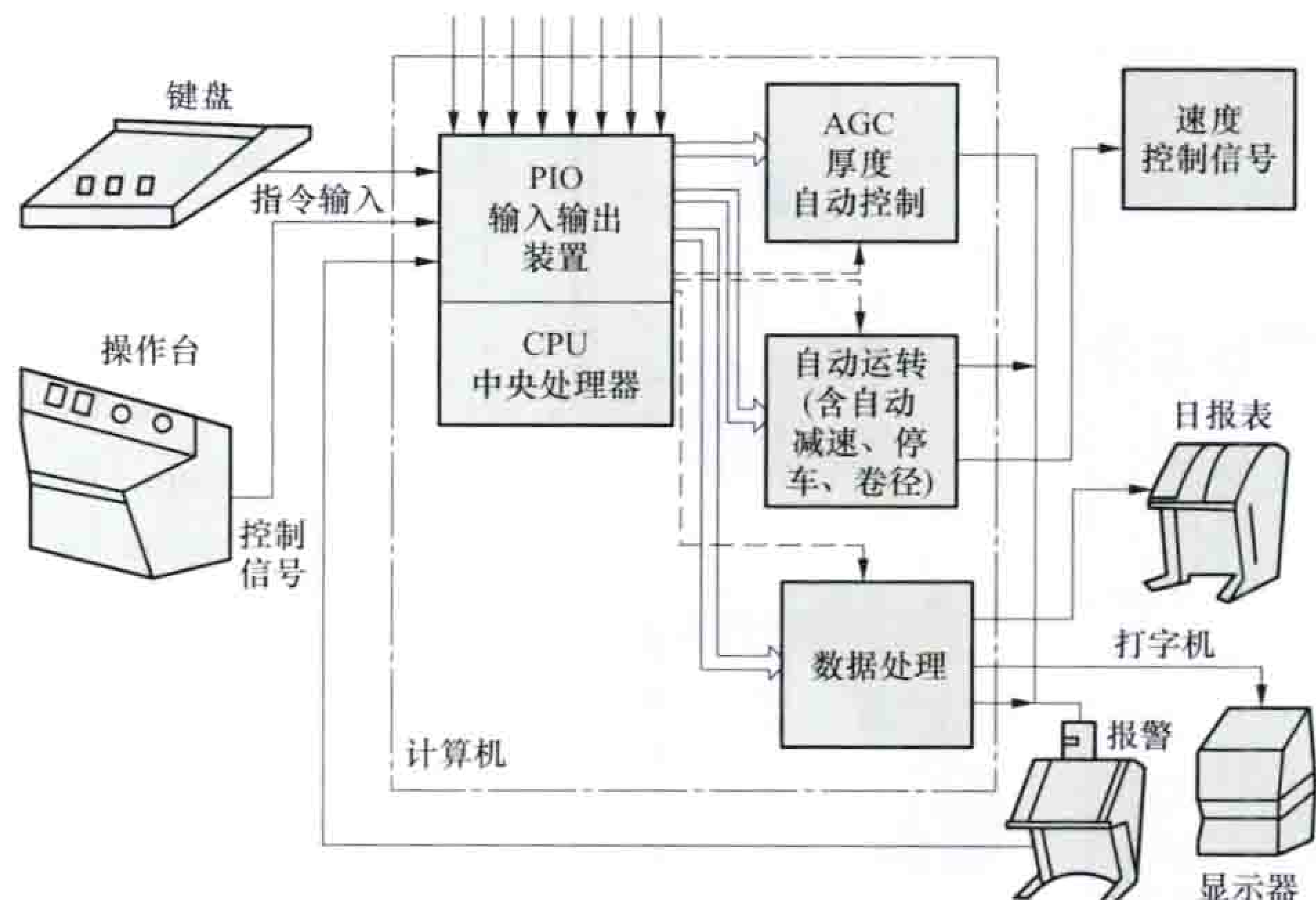


图 2　计算机控制的四辊可逆冷轧机电控系统框图

为了便于操作人员掌握工艺流程中的重要数据，在主操作台上安装了工艺数据显示装置。该装置以彩色屏幕显示，最重要的工艺数据用曲线、光带或数字显示。这些工艺数据包括尺寸误差、压下位置、卷取张力、轧制速度、轧制力和卷重等。

keni rezhaji diankong xitong

可逆热轧机电控系统 (electric drive control system for reversible hot-rolling mill) 用以实现可逆热轧机正常运转的电力拖动和控制等电路组合的总体。可逆热轧机包括初轧机、带立辊的万能板坯轧机。它们具有作业率高、产量大的特点，要求主传动能频繁、快速地正、反转，从正向额定转速到反向额定转速仅需 1.5～2s。为满足这一要求，一般采用低速大容量直流电动机，电动机转动惯量小、过载能力强。可逆热轧机的压下、剪断、辊道等主要辅助机械也要求快速、可逆重复短时工作等。

可逆热轧机电控系统可分为直流电控系统、交流电控系统和计算机电控系统。

直流电控系统　直流主传动采用晶闸管变流器供电。图 1 所示为典型的直流电控系统框图。该系统采用逻辑无环流的非独立控制系统，具有速度、电流双闭环回路，完全能满足快速可逆的要求，工作可靠、维护方便。由于主传动容量大，在工作时对电网产生强大的有功及无功冲击，引起电压波动、功率因数下降和产生高次谐波。为抑制电网输入侧的谐波，主传动装置多采用 12 相整流，错开上、下辊变压器相位，组成等效的 24 相整流。同时根据电网情况增设无功补偿装置。

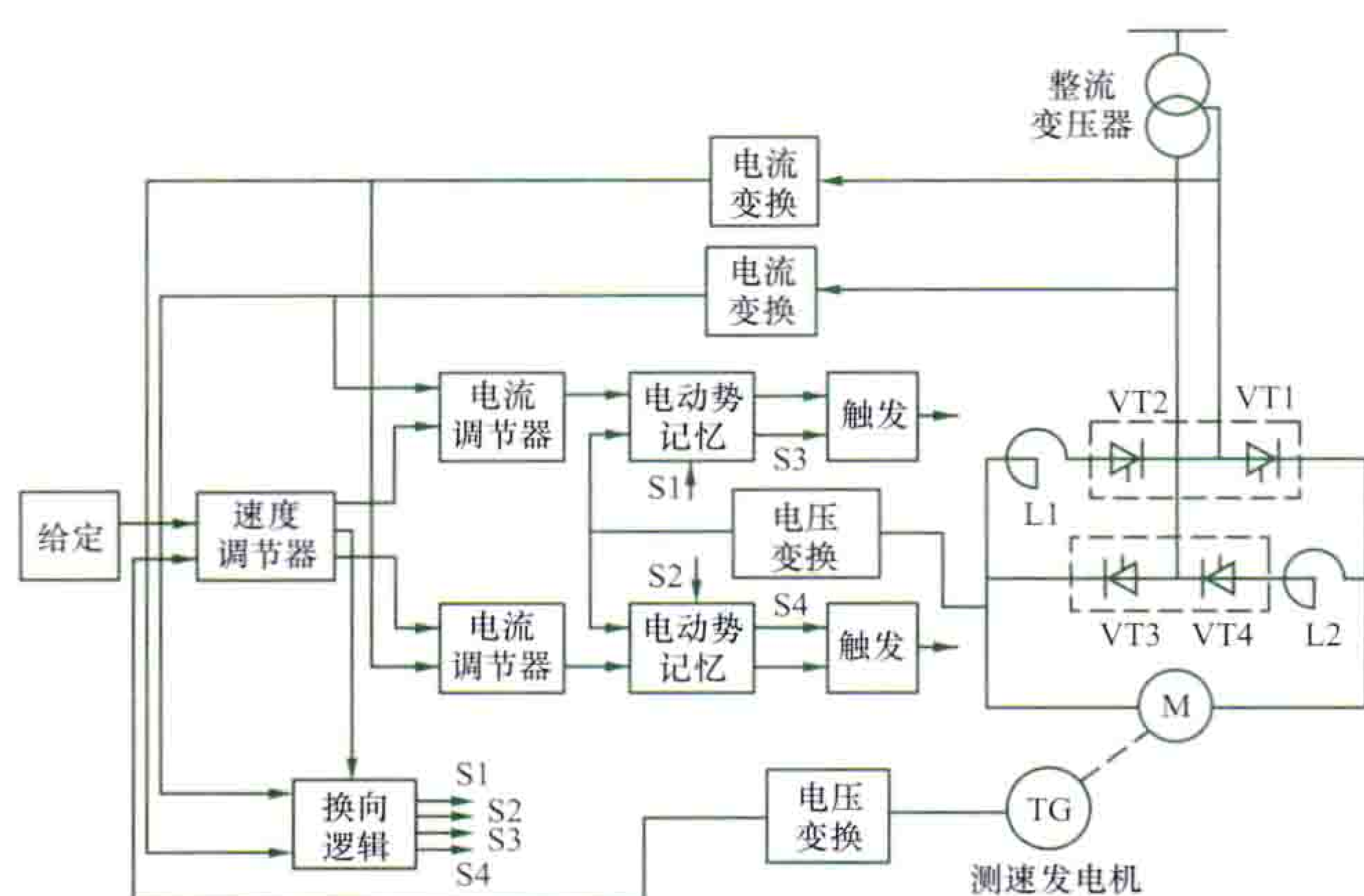


图 1　直流电控系统框图

交流电控系统　随着轧制过程的强化，使用的直流电动机容量逐渐满足不了主传动用系统的要求。另外，由于电力电子器件的发展及微机的应用，使复杂的交流变频装置在快速可逆系统上的应用得以突破。从 20 世纪 80 年代开始，交流主传动的可逆热轧机便陆续投入运行，其传动电动机采用同步电动机或笼型感应电动机，图 2 所示为同步电动机的交流电控系统框图。与直流电控系统相比，交流电控系统的优点在于：①没有换向器电刷，减少了维护工作量；②在相同容量、转速下，有较小转动惯量，有更好的动态性能；③具有更大的容量，单机可达 10000kW 以上；④励磁容量小，发热少，比直流机有更高的效率，既节电、又节水；⑤由于采用矢量控制，其控制性能高于直流电控系统，故在大型可逆热轧机主传动上应用广泛。与直流电控系统相比，交流变频系统复杂，装置造价高，但大型交流电动机比直流电动机便宜，故交流电控系统多用于大容量可逆热轧机上。(见交流-交流直接变频调速、变频器、交流电动机矢量控制)

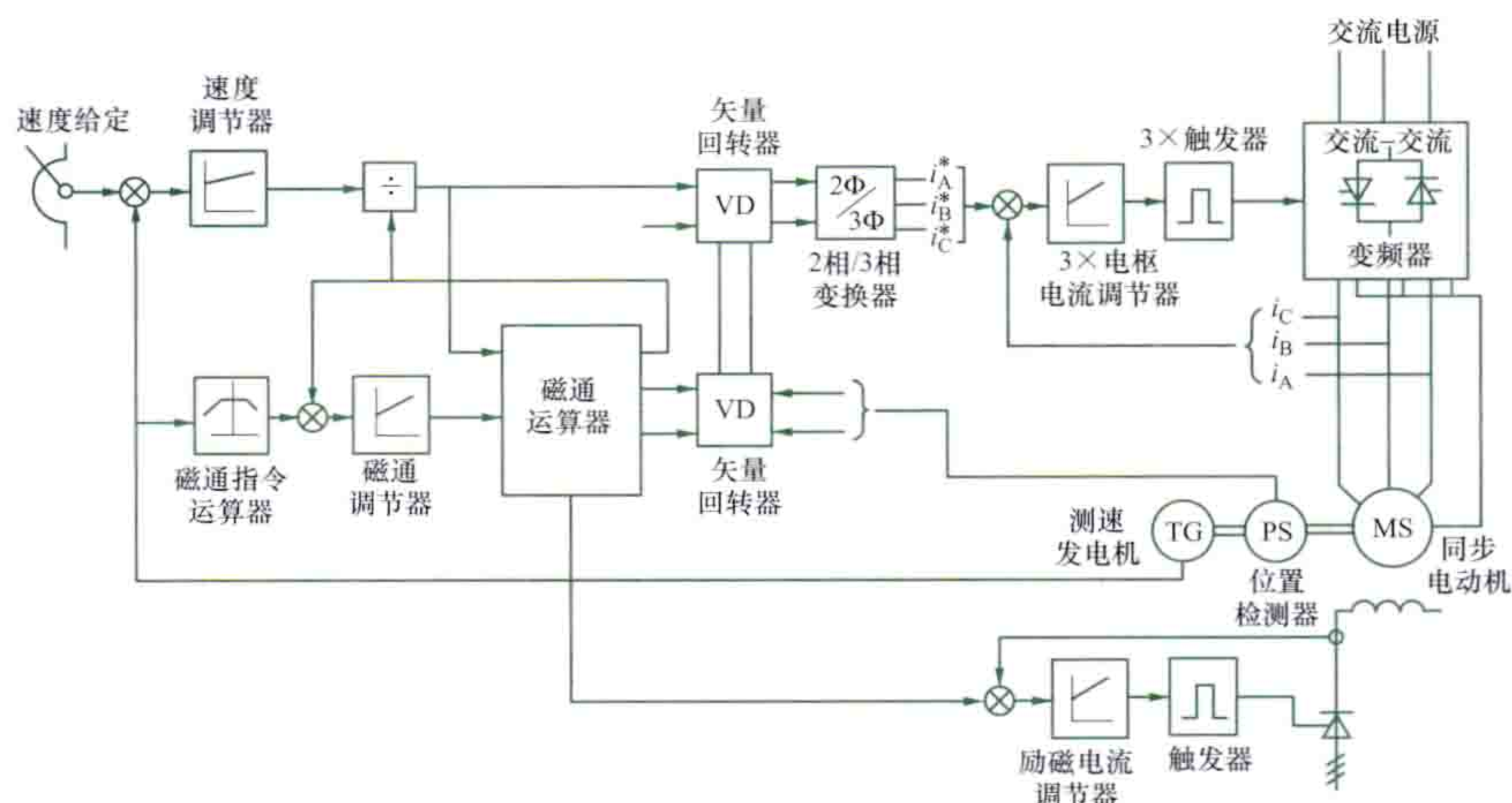


图 2　交流电控系统框图

计算机电控系统　可逆热轧机主传动及其主要辅助机械的自动运转控制，因为计算机的应用而得到完善。万能板坯轧机因无对孔型、翻钢等操作，比方坯可逆轧机易实现自动控制。图 3 所示为万能板坯轧机计算机电控系统框图。它包括钢坯位置跟踪、轧机轧制数据跟踪、最佳轧制表的计算、自动位置控制等控制功能。该系统根据最佳咬入速度和使轧件抛离轧辊距离为最小的原则，消除无效时间，进行高效率轧制。

随着微型计算机的不断发展，全数字电控系统在可逆轧机上也得到应用。图 4 所示为一台厚板轧机主传动直流电动机的全数字电控系统。与模拟系统相比，数字系统有以下优点：①响应速度快，精度高，能考虑系统中的非线性特性；②容易实现系统的故障自诊断；③调试方便。由于使用 EEPROM（电可擦可编程只读存储

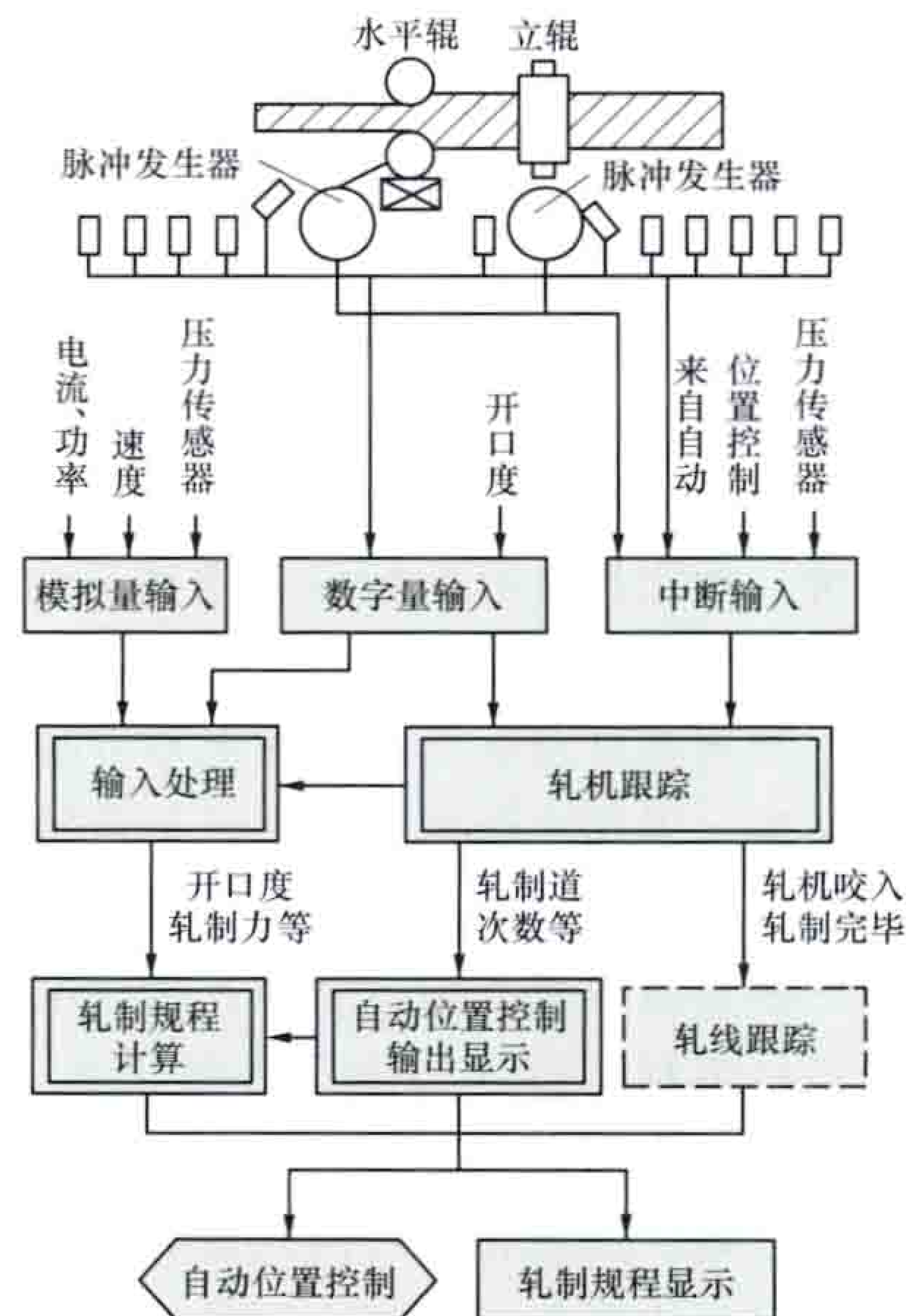


图 3　计算机电控系统框图

器），使系统某些参数更改方便，缩短了调试时间。

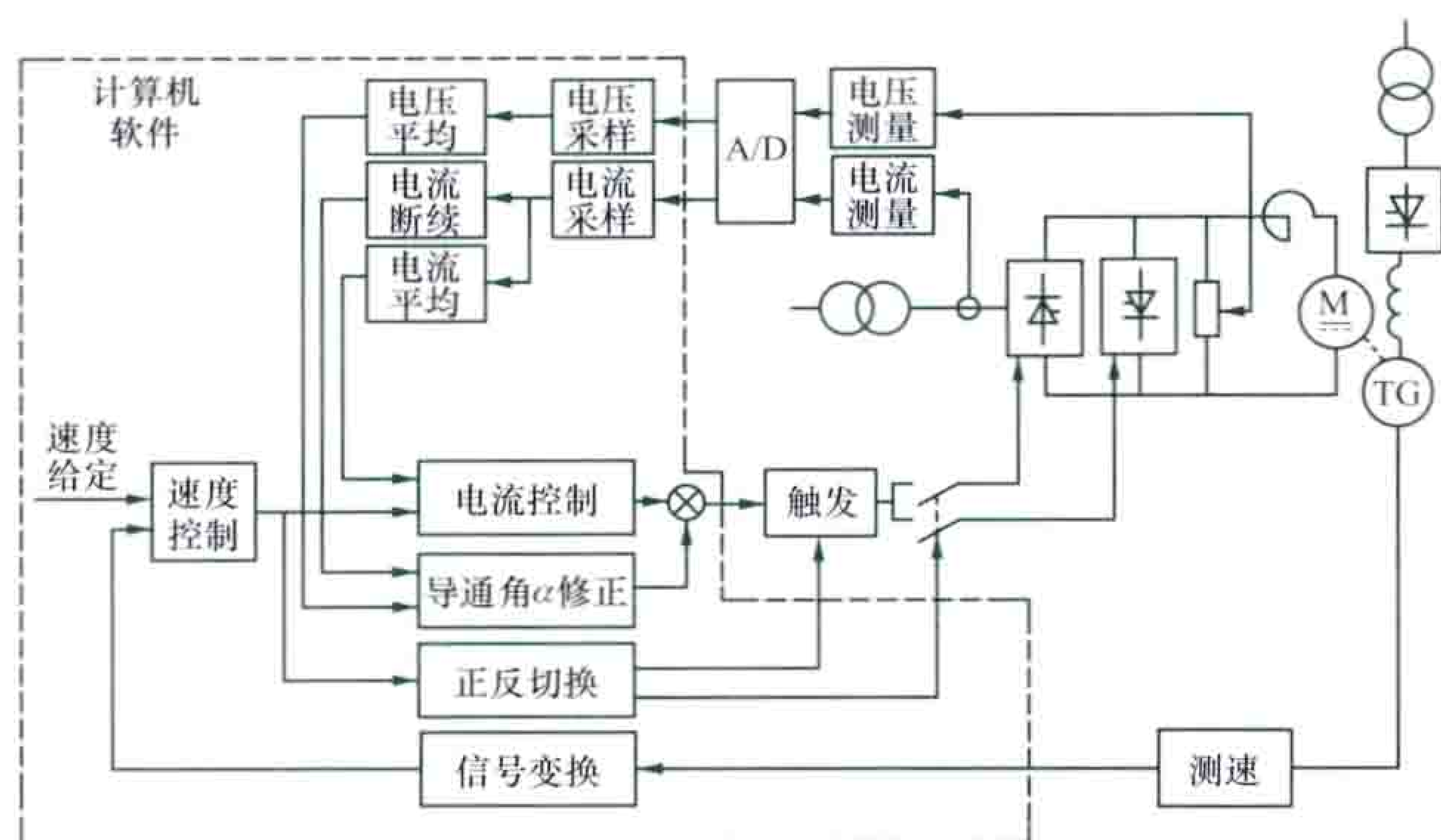


图 4　轧机用全数字电控系统

kezhongduan fuhe guanli

可中断负荷管理　(interruptible load management)

在电力系统高峰时段或者紧急状态下实现电力负荷削减的一种需求侧管理措施。可中断负荷管理与电力系统安全经济运行密切相关，在电力系统峰值或者紧急状态下，供电企业根据与用户签订的可中断负荷管理合同约定，向用户下达中断或削减用电负荷指令，达到削峰填谷、缓解负荷高峰时供电紧张状况的目的，以减少旋转备用容量和满足用电需求增长而需要的发电容量投资。

可中断负荷管理主要包括潜力分析与规划、合同设计、合同签订与执行、合同结算等内容。

潜力分析与规划　分析评估地区可中断负荷潜力并对其用户市场进行项目规划和推广。①分析地区用电负荷构成。供电企业对用电地区的用电负荷构成情况、各类负荷的用电特性、该地区的用电结构等情况进行分析，评估可中断负荷潜力并选定潜在的用户市场。②选择可中断负荷对象。一般而言，对冶金、水泥、机械制造、纺织和造纸等大工业用户实施可中断负荷措施最具有成本效益，潜力很大。③项目规划与推广。根据地区电网需求和地区可中断负荷潜力，规划实施可中断负荷项目，并在选定的潜在用户市场中推行。

合同设计　确定可中断负荷管理的合同内容，明确可中断负荷的特性，约定可中断负荷执行方式及费用结算等事项。可中断负荷管理合同一般应包括：①合同有效期限。约定进行可中断负荷管理的有效时间。②提前通知时间和中断持续时间。根据可中断负荷的基本特征，约定对其提前通知的时间和中断持续的时间。③可中断负荷容量和可中断负荷电价。约定执行可中断负荷管理后应给予用户的补偿费用。④违约惩罚。约定违约的处罚事项。

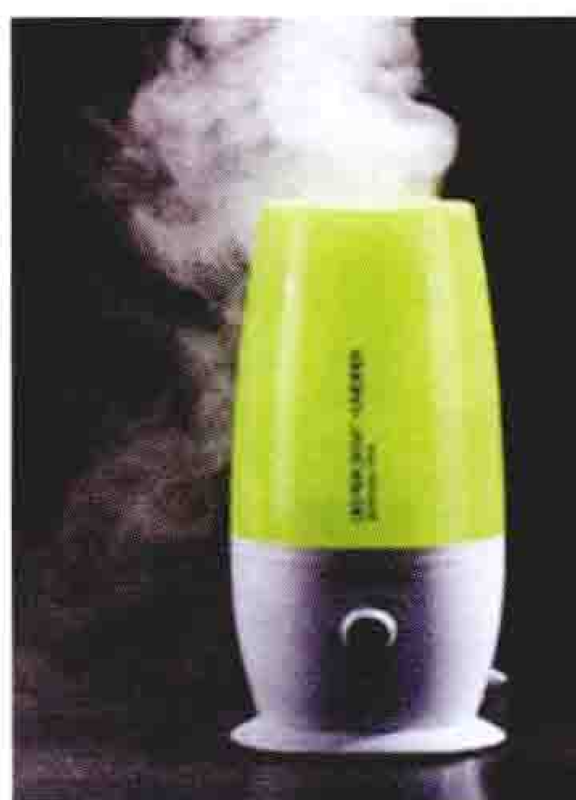
合同签订与执行　供用电双方签订可中断负荷管理合同并实施。①用户选择适合自己负荷特性的可中断负荷管理合同形式，并申报能适应的中断持续时间、可中断负荷电价、可中断负荷容量等信息资料。②供电企业研究分析用户申报的信息资料、技术实施条件等情况，结合电网相关情况信息，对申报用户可中断负荷实施方式进行评估和最优选择并签订合同。③在系统峰值时或者紧急状态下，根据供用电双方签订可中断负荷管理合同的约定，实施可中断负荷管理的操作执行。

合同结算　根据用户参与可中断负荷项目中被调用和违约情况记录及相应信息，供电企业按照合同约定对用户给予相应的经济补偿或相应的处罚。

kongqi jiashiqi

空气加湿器　(air humidifier)

一种用来增加室内空气中水蒸气含量，以提高空气湿度的器具。空气加湿器（见图）常用于家庭居室、环境试验室、计算机房等需要控制湿度的地方。根据工作原理的不同，空气加湿器可分为超声波式、纯净式、热蒸汽式等不同形式。



空气加湿器

超声波式空气加湿器　利用超声波产生高频振荡把水激活，将其雾化为 1～5μm 的超微粒子，使之迅速喷出，对空气加湿。它具有体积小、能耗低、可控性能好、无噪声、使用维修简便等特点。

纯净式空气加湿器　通过分子筛蒸发技术，除去水中的钙镁离子，通过水幕洗涤空气，将空气加湿的同时也净化了空气，再经风动装置将湿润洁净的空气送到室内，从而提高环境湿度。

热蒸汽式空气加湿器　利用电加热使水蒸发对空气加湿。其加热方式分电热式和电极式两种。电热式加湿器利用电加热器加热，使水沸腾汽化对空气加湿。电极式加湿器是通过水中的通电电极，使水沸腾汽化对空气加湿。使用电加热方式的加湿器技术最为简单，由于能耗大、易结垢的缺点，在市场上已不多见。

kongqi jinghuaqi

空气净化器　(air cleaner)

一种能够吸附、分解或转化空气污染物（一般包括粉尘、花粉、异味、甲醛之类的装修污染、细菌、过敏原等），提高空气清洁度的家用电器，又称空气清洁器。空气净化器起源于消防用途，1823 年，约翰和查尔斯·迪恩发明了一种新型烟雾防护装置，可使消防队员在灭火时避免烟雾侵袭。1854 年，约翰斯·滕豪斯发现向空气过滤器中加入木炭可从空气中过滤出有害和有毒气体。20 世纪 80 年代，空气净化的重点已经转向空气净化方式，家庭空气净化器能去除空气中的粉尘、花粉、异味、甲醛之类的装修污染、细菌、病毒、过敏原等。空气净化器外观见图 1。



图 1　空气净化器外观

空气净化器主要由除尘过滤部分（预过滤器、主过滤器）、除臭过滤器和风扇等部分组成（见图 2）。空气净化器工作时，被风扇吸入的空气经过采用滤网技术的预过滤器，滤去空气中直径稍大些的悬浮颗粒物，再经过采用静电吸附技术的主过滤器，使空气中的更微小悬浮颗粒物带上电荷，并被吸附在电极板上，不再随空气流动。经过上述过滤的清洁空气从空气净化器出风口吹出。

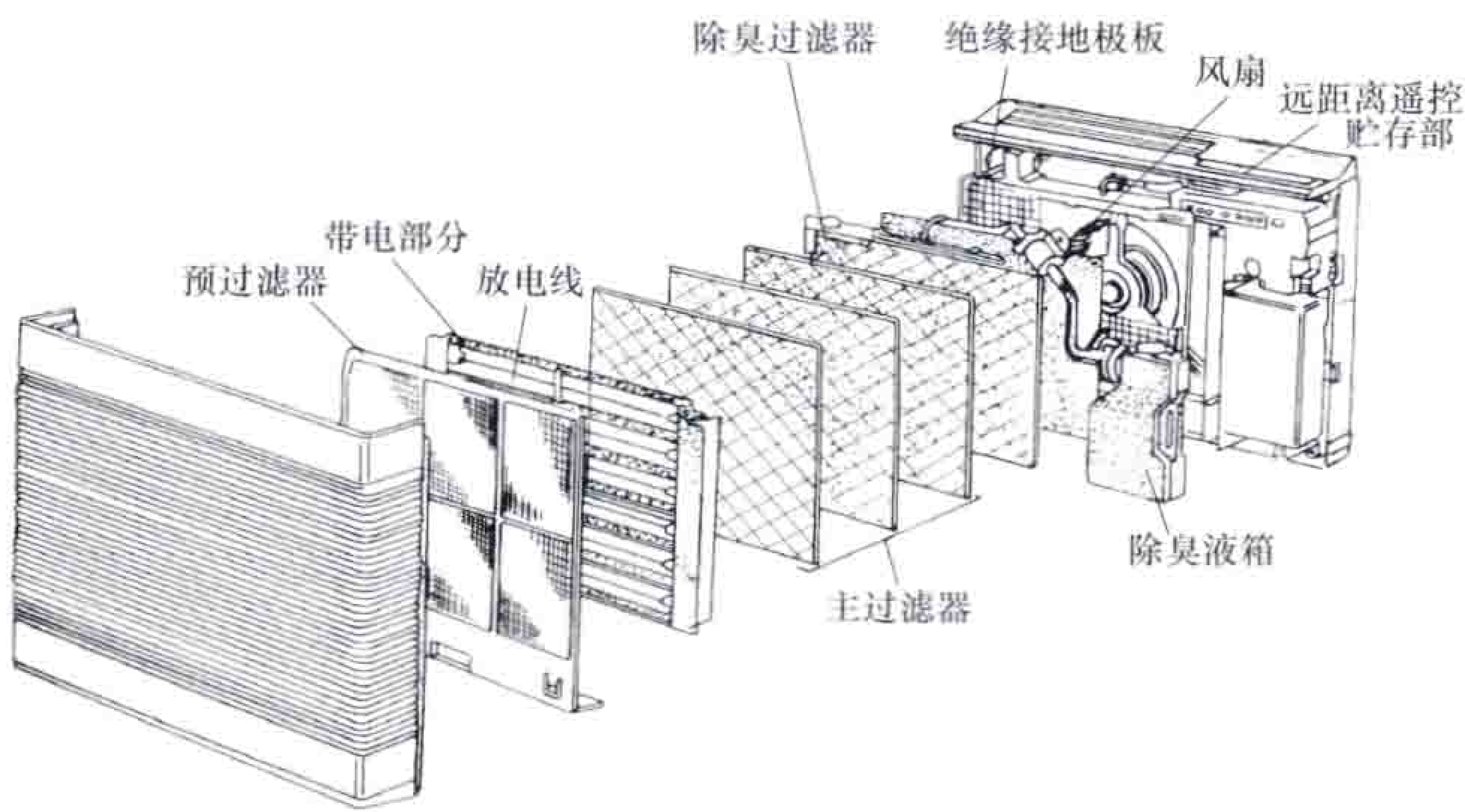


图 2　空气净化器结构

在空气净化器中加入空气负离子发生装置，便称为负离子空气净化器。空气负离子指空气中带负电荷的分子或原子。空气的主要成分是氮（约占 78%）和氧（约占 21%），通常氮或氧所带正、负电荷数量相等，电性能呈中性。但当空气分子电离（在自然界的宇宙线、紫外线、地球上微量放射物质辐射等作用下，空气分子失去部分围绕原子旋转的电子）产生的电子与其他中性气体分子（大部分为氧分子）结合时，气体分子即带负电，称为空气负离子。空气负离子发生装置由高压发生器、负极针和风扇等组成，见图 3。它使用市电电源，耗电功率几十瓦。接通电源后，高压发生器产生数千伏的直流高压，加到铜板和负极针上，负极针的尖端放电，将周围的空气电离。电离过程中产生的正离子被强大的负高压电场吸回极针和铜板条上，负离子则受负电场排斥，迅速移开并带动周围空气流动形成一股“电子风”。负极针周围呈现负压，未被电离的空气涌入，继续被电离，高浓度的空气负离子便不断向外扩散。

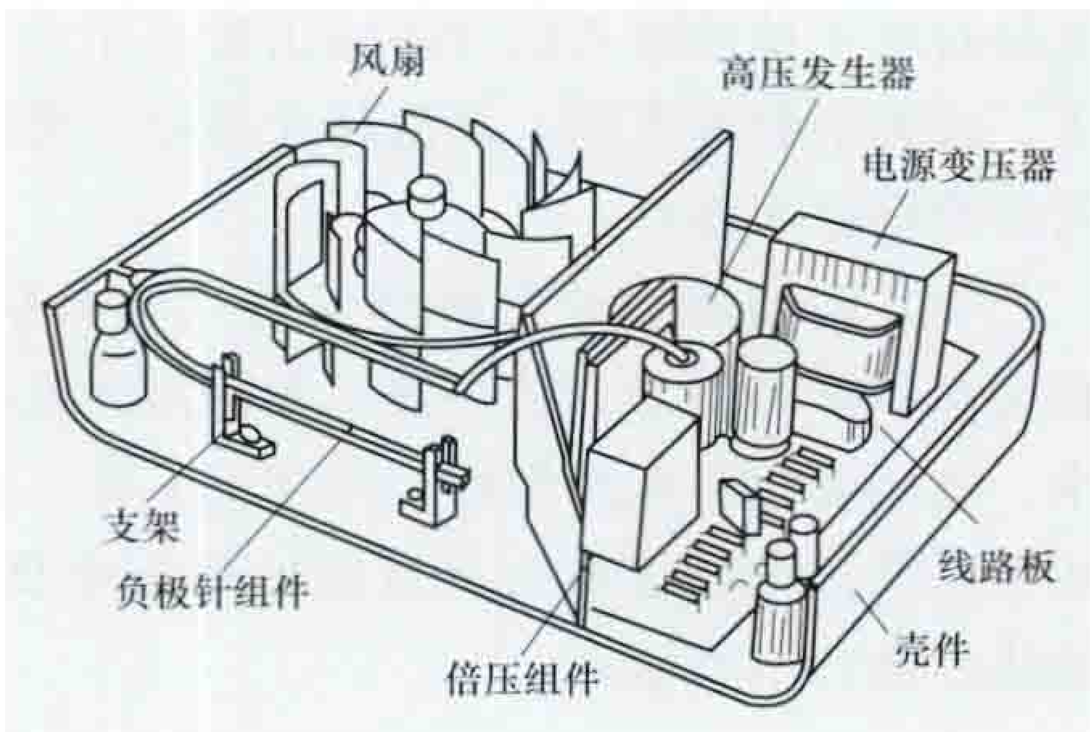


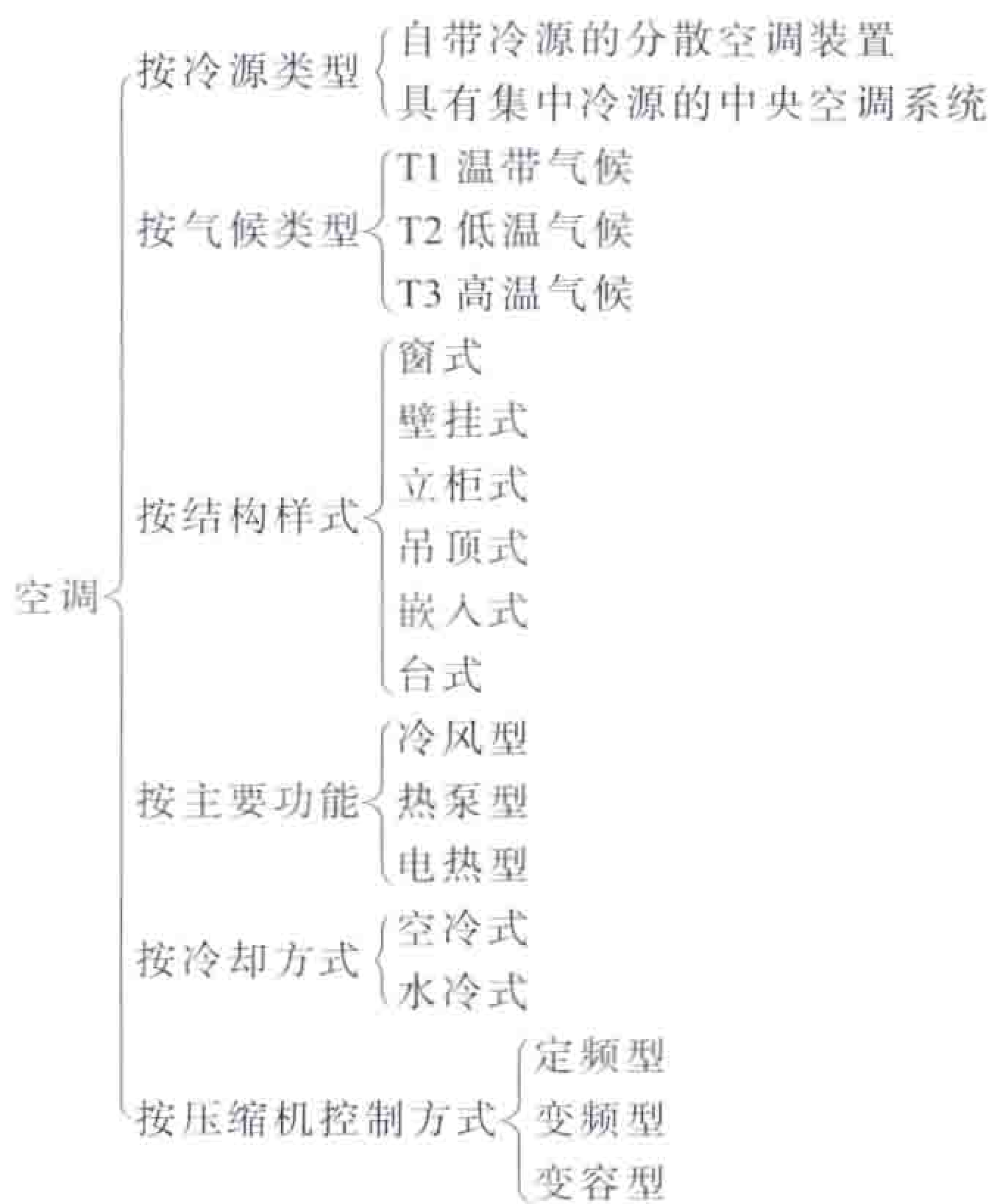
图 3　空气负离子发生装置结构

另外，带有除臭功能的空气净化器，利用活性炭或化学除臭方式可去除空气中的生物型异味。带有防菌过滤部件的空气净化器，利用防菌材料抑制或防止附着在过滤器上霉菌的继续繁殖。

kongtiao jiedian jishu

空调节电技术　（electricity saving technology of air conditioner）　降低空气调节装置电能消耗的措施与方法。房间空气调节器简称空调。空调是使室内空气的温度、相对湿度和清新度等控制在允许范围内的一种设备，包括空调机组、空气处理装置、末端装置以及将上述装置相互连接起来的风管和水管。

分类　空调的分类方法有很多，一般可根据冷源类型、气候类型、结构样式、主要功能、冷却方式、压缩机控制方式等区分，如下所示：



发展　1920 年美国在电影院首先采用空调装置。使用空调的目的一是为了保持室内（如礼堂、剧院、宾馆、饭店、商场、医院、体育馆办公楼、居民家庭等场所）空气环境的舒适性；二是为使生产厂房（如纺丝车间、电子元件生产车间、计算机房等场所）内的空气环境维持在工艺所需的条件，以提高产品质量，改善劳动条件，提高劳动生产率。20 世纪 70 年代石油危机以后，随着能源成本的增加，空调节能节电的问题引起了普遍的重视。20 世纪 70 年代以前，中国只发展满足生产要求的工业性空调，80 年代末，空调开始进入居民家庭。中国空调的使用已经得到普及。在大型场所如宾馆、体育馆、商场、车间等一般采用有集中冷源的中央空调系统。居室和小型场所，则采用自带冷源的空调装置，如分体壁挂式和分体柜式空调；在一些别墅和室内面积较大的住宅区，家用中央空调作为小型的集中冷源中央空调系统也受到了人们的青睐。

节电措施　主要有减少空调的冷、热负荷，提高空调装置的运行效率和采用蓄冷技术。

（1）减少空调的冷、热负荷。主要方法有：①改善建筑物围护结构的热工性能与光学性能，如采用保温性能好的材料砌墙体和屋顶；采用外遮阳措施，减少透入室内的太阳热；采用有热反射涂层的外窗与外门；采用门窗密封条等。②采用高效冷光光源，选择合适的照度；采用控制开关来控制室内主要用电器具。

（2）提高空调装置的运行效率。主要方法有：①选择单机效率高的制冷机、风机、水泵电机等设备；②单机容量和台数可与冷（热）负载变化规律相匹配，实行经济运行；③采用变频技术和经济合理的调速方式，使单机与系统保持在高效区运行；④规定合理的温、湿度标准，采用多功能温控器，对室内的空气温、湿度进行自动调整；⑤对风管进行保温隔热，消除漏风，减少系统的循环风量；⑥回收排风中冷量（或热量），用于对新风量的预冷（或预热）。

（3）采用蓄冷技术。采用蓄冰（或冷冻水）制冷方式运行。利用夜间电网低谷负荷时的电力制冰（或冷冻水），将制得的冷量储存起来，待到白天电网高峰负荷时将冰（或冷冻水）储存的冷量交换出来调节空气温度，这样电网高峰负荷可不开或少开制冷压缩机，既可缓解电网高峰负荷时的电

力不足或可少装机组，又可利用夜间气温低、制冷单耗小的有利因素节约用电。空调蓄冷技术适用于宾馆、饭店等有中央集中空调系统的场合，也适用于纺织、制药行业需用冷冻水的企业，办公楼、商场、影剧院、体育场馆等非全天用冷场所的空调系统采用蓄冷技术的节电效果更佳。（见蓄冷空调技术）

kongzhi dianji

控制电机 （control motor） 在运动控制系统（对位置、速度、加速度、力或转矩进行精确控制的系统）中作执行元件、检测元件、反馈元件、变换元件、放大元件用的各种电机以及在解算系统中作解算元件用的各种电机的总称。曾称控制微电机。微电机是指折算到1000r/min时连续额定功率在750W及以下，或机壳外径不大于160mm或轴中心高不大于90mm的电机。实际上，随着控制系统的功率和使用范围的扩大，不论是军用还是民用控制系统中使用的电机，从功率、质量、体积方面都早就超出"微"的范围。

控制电机作为传感器、执行器及电源设备广泛地应用于运动控制系统中以适应旋转、直线、往复、摆动、平面等运动的需要，在军事装备、航空航天装备以及机器人中都起着十分重要的作用。20世纪60年代，约95%的控制电机用于军事装备。80年代工业上应用的比重上升至60%～70%，在机床控制、过程控制及其他工业领域用以提高自动化程度、降低劳动消耗和提高质量。按军用标准要求，控制电机的工作寿命仅为1000h或只有几年，而工业应用则要求长达10年或20年，且价格较低。

分类　主要应用的控制电机大致可分为自整角机、旋转变压器、感应移相器、感应同步器、轴角编码器、测速发电机、伺服电动机、力矩电动机、步进电动机、开关磁阻电动机、同步电动机、低惯量电动机等。

其他控制电机还有电机扩大机、传输解算器、直线式差动变压器、旋转式差动变压器、伺服测速机组、自整角伺服力矩机。①电机扩大机。特殊结构的直流发电机，对各控制绕组输入的电信号在电机内进行励磁合成，其结果经放大并以一定功率输出，在自动控制系统中作为功率放大元件，应用最普遍的是交磁电机扩大机。②传输解算器。类似于自整角机和旋转变压器的交流控制电机，它可将三线自整角信号与四线旋转变压器信号相互转换。③直线式差动变压器。基于电磁感应原理的直线位移检测元件，在一定范围内，它的输出电压幅值与可动铁芯的直线位移成正比关系。④旋转式差动变压器。基于电磁感应原理的角位移检测元件，在一定范围内，它的输出电压幅值与转子偏离电气零位的角度成正比。⑤伺服测速机组。由伺服电动机和测速发电机组成一体的机组。⑥自整角伺服力矩机。由自整角变压器、直流力矩电动机和电子电路构成的小功率伺服组件，它接收自整角发送机的电信号，精确复现发送机的轴位和运动。

结构　控制电机的结构大体分为电磁式、组合式和机电一体化式三类。

（1）电磁式控制电机。属传统式控制电机结构，与普通电机相似，有定子和转子两部分，其间有气隙。其结构紧凑，要求定子、转子的同轴度高，磁路对称和电路平衡。

（2）组合式控制电机。多台不同控制电机的组合。例如将不同的旋转变压器、感应移相器、自整角机和伺服测速机组组成功能组件，用于近程导航设备。也可应用共磁路技术，将两台不同控制电机的绕组装置在同一铁芯上，输出特性能满足两者的要求。这类电机不仅使用方便，结构紧凑，更重要的是提高了整机的性能。

（3）机电一体化式控制电机。控制电机与电子线路、微机的组合。例如开关磁阻电动机是利用转子位置传感器通过电子功率开关控制各相绕组导通使之运转的一种机电一体化控制电机。又如，以微机控制驱动电路的步进电动机也属此类，它能按预置程序运行。

基本要求　控制电机的作用是完成控制信号的传递和变换，对其要求主要是运行的高可靠性、快速响应和高精度。

（1）高可靠性。常用使用寿命、失效率、可靠度和平均无故障时间等参数来表征。例如，元件的可靠性如果是99.5%，则40个元件组成的系统可靠性仅有81.8%（0.995^{40}），100个元件组成的系统可靠性仅有60.5%。一套自动控制系统要使用数十台甚至数百台控制电机，因此控制电机运行时必须有高可靠性。

（2）快速响应。常用机电时间常数和灵敏度来表征。这些都直接影响系统的动态偏差、振荡频率和振荡时间。灵敏度是对应于单位输入信号的输出量大小，可用比转矩、比电压、放大系数等表示，其值越大越好。而起动电压、机电时间常数则越小越好。

（3）高精度。对于信号元件（转换信号的控制电机），精度包括静态偏差、动态偏差和使用环境温度变化、电源频率、电压变化引起的漂移；对功率元件（把信号转换为输出功率以及把电能转换为机械能的控制电机），精度包括特性的线性度和不灵敏区。

发展简史及趋势　1879年德国工程学家E.W.西门子（E.W.Siemens，1816—1892）和J.G.哈尔斯克（Jchann Georg Halske）在英国获得第一个自整角机专利。1913年美国通用电气公司首次将自整角机用于巴拿马运河，指示各控制站的闸门护板及测量水位浮标。20世纪40年代前后形成了自整角机、旋转变压器、伺服电动机和测速发电机等门类的基本系列。40年代以来逐步形成了较成熟的理论，如自整角机同步随动理论、旋转变压器逐级串接解算原理、伺服电动机稳定运行理论、增量运动及其控制理论等。60年代前后，一些典型控制电机的理论、设计和标准大致完善，机座号、外形尺寸、安装方式和主要技术指标逐步统一。60年代起，出现多种适应特殊要求和数字控制技术的高精度、高灵敏度和高可靠性新品种。70年代以来，电子技术与电动机技术的结合发展很快，出现了机电一体化的新产品，如开关磁阻电动机、采用电子细分微步技术和电子阻尼线路以缩小步距角的步进电动机等。


E.W.西门子

中国在1949年以前没有制造控制电机的能力。1949年以后，上海新成电器厂、上海新安电机厂、上海福光电机厂为雷达系统配套生产了自整角机。1951

年中南电工厂（即湘潭电机厂）生产三相 1/20hp（36.78W）自整角机 14 台，这是中国控制电机的萌芽。1954 年哈尔滨电机厂制造出第一台 ZKK-25 型交磁电机扩大机。60 年代中期，中国已有 9 类系列产品，形成了第一代控制电机系列产品。70 年代末，共有 14 类 734 个规格自行设计的新系列产品问世。80 年代以来，国产控制电机已能满足需要。

控制电机在军事装备、航空航天装备以及民用工业中都得到日益广泛的应用，其主要发展趋势有：①向智能化和多功能的方向发展，可实现整机最佳化、智能化，并扩展其功能。②新型稀土材料、非晶合金、陶瓷材料等的出现和应用将使控制电机的性能产生质的飞跃。③控制电机小型化。④节能型和机器人电动机将有长足发展。

kongzhi qifen dianzulu

控制气氛电阻炉（controlled atmosphere resistance furnace） 人工控制炉内气氛的电阻炉，又称可控气氛电阻炉。炉内气氛主要分自然气氛和控制气氛两类。自然气氛是指炉子工作过程中自然形成的气氛，主要由空气和炉料处理过程中产生的气体形成。金属在自然气氛中加热，表面会氧化、脱碳，甚至产生严重的氧化皮层。控制气氛是由人工从炉外送进某种特定成分的气体或其他物质在炉内裂解形成的。在控制气氛中进行加热，金属表面不仅可以达到少、无氧化或脱碳，而且可以根据需要对金属表面原有的氧化皮进行一定的还原，或对某些金属零件进行复碳。控制气氛炉也可进行化学热处理，如渗碳、渗氮、碳氮共渗等，同时还可以实现硅钢片的脱碳退火。采用控制气氛热处理，可以改变工件的表面组织结构，提高零件的使用性能，如表层的粗糙度、硬度、耐磨性、耐腐蚀性和疲劳强度，减少工件的加工余量和加工工序，节约金属的消耗。

控制气氛 控制气氛的种类很多。形成控制气氛的方法主要有：①利用氢、氮、氩或氨等的高压瓶装气体单一或混合后直接使用。②用化学反应的方式形成。如用氨分解装置分解氨生成氢氮混合气体，或经燃烧净化处理后所得的气体（主要是氮）；利用适量空气与碳氢化合物（天然气、丙烷、丁烷）或煤气等混合，在一定条件下反应生成的气体（其中空气比例小，反应中需从外部吸收热量的叫吸热式气体；空气比例大，反应中释放热量的叫放热式气体）。③用物理的方式制备。如用碳分子筛、中空纤维膜滤除空气中的氧气，获得高纯氮气，也称空分筛或膜制氮。④直接向炉内送入化学物质（天然气、丙烷、甲醇、乙醇、丙酮、异丙醇、醋酸乙酯、尿素或煤油等），使之受热分解或反应而形成的气体。

上述方法常混合使用，以得到所需成分的气氛。如吸热式气氛用于渗碳时常添加富化气——丙烷；使用工业氮（瓶装氮、用中空纤维膜或碳分子筛直接从空气中制取的氮等）时，常同时向炉内滴注有机液体，形成所谓氮基气氛，等等。

主要用来保护金属免受氧化或脱碳的控制气氛，如氩、氢、氨分解气氛、放热式气氛等叫保护气氛。能对钢件表面进行化学热处理——渗碳、渗氮等的气氛，分别叫渗碳气氛、渗氮气氛等。

送入炉内的气体或有机物质在炉内会发生化学反应生成几种简单气体的混合物。如渗碳气氛通常是 CO、H_2、H_2O、CO_2、CH_4、O_2和 N_2的混合物。某一种纯净的原料在炉内同样的条件下（炉子结构、炉内温度等）所形成的气氛，其各组分的百分比是一定的。一定组分百分比的渗碳气氛对钢件进行渗碳，钢材表面的含碳量最终会趋于一个定值。这个值叫作气氛的碳势。渗碳气氛的碳势可以通过向炉内添加其他气体或有机物质以改变各组分百分比的方法加以改变，从而实现对被处理钢件表面含碳量的控制。根据相同原理，在渗氮过程中，通过控制氨的分解率达到控制炉内氮势的目的。

炉体结构特点及配套设施 各类自然气氛电阻炉经过改进后都可以做成控制气氛电阻炉，常用的控制气氛电阻炉有密封箱式、台车式、井式（见图 1）、罩式、管式、传送带式、推送式、振底式、滚筒式、辊底式、转底式等。炉体的结构分为有罐和无罐两类。具有耐热钢炉罐的设备，控制气氛只在炉罐内部流动，不接触炉衬和加热元件，炉衬结构和所用材质与普通电阻炉相同，炉罐气密封结构简单，气氛消耗量少，炉气容易控制。开炉时预渗时间短，但要消耗耐热钢，且炉罐不宜做得太大，结构也不宜太复杂。炉子的使用温度受耐热钢炉罐的制约也不能过高，一般在 1100℃ 以下。无罐炉炉内没有炉罐，控制气氛直接与炉衬和加热元件等接触，炉子的气密封主要依靠加热元件、热电偶、炉门等与炉壳的特殊密封结构来实现，炉壳必须进行满焊，以防漏气。由于没有炉罐，所以每次开炉时预渗及换气时间较长，但炉子的使用温度可以提高，如氢气钼丝烧结炉的炉温可达 1800℃ 左右。一般大型结构复杂、连续生产的可控气氛炉多采用无罐结构形式。井式气体渗碳炉、井式气体渗氮炉、罩式炉、滚筒炉、转筒炉、有马弗网带炉多为有罐炉。密封箱式炉、推送式炉、辊底炉、转底炉、铸链板式炉、无马弗网带炉等大多为无罐炉。



图 1 井式渗碳炉

与普通电阻炉相比，控制气氛电阻炉的结构特点是：①炉体具有良好的气密性，可以减少炉气损失和避免炉气对环境的污染，且便于对炉气的控制。②炉内一般都配置风扇，以保证炉气均匀。对渗碳炉而言，炉内气氛的均匀性是保证渗碳零件质量好坏的关键。③处于控制气氛中的构件，在材料的选择上应考虑气氛的影响。如各种电热合金在控制气氛中，由于受到气氛不同程度的侵蚀，其最高使用温度通

常比在空气中使用时要低；与炉气接触的耐火材料要能抵御气氛的侵蚀且不释放出破坏炉气成分的气体，对其材料的成分和杂质均有一定的要求，如在渗碳气氛中使用的耐火砖，不但要求其三氧化二铝含量高，且三氧化二铁含量要低于1%等。④对无罐渗碳炉，为防止炭黑析出使加热元件短路或渗碳后快速损坏，采用电热辐射管组件，这样可以防止炉气与电热体接触；也有采用大截面波形电阻带加热元件，并用低电压供电（≤70V）的，这种结构已很少采用。⑤大部分控制气氛是可燃性气体，应设防爆装置。对排出的有害气体应采取措施，以免污染环境。

控制气氛电阻炉配套设施主要有气源装置，以便在炉内形成所需成分的气氛。主要气源装置有吸热式气体发生装置、放热式气体发生装置、氨分解或氨燃烧装置、空气分离制氮装置、瓶装气供应装置、有机液滴注装置等。渗碳或渗氮炉大多配备有碳势或氮势控制装置。控制气氛电阻炉还常与淬火槽、清洗机、回火炉等设备配套组成热处理生产线，以提高生产率。图2所示为密封箱式气体渗碳炉结构，图3所示为网带式光亮淬火炉的一种炉体结构，图4所示为由推送式气体渗碳炉为主组成的一条汽车齿轮气体渗碳生产线成套机组。

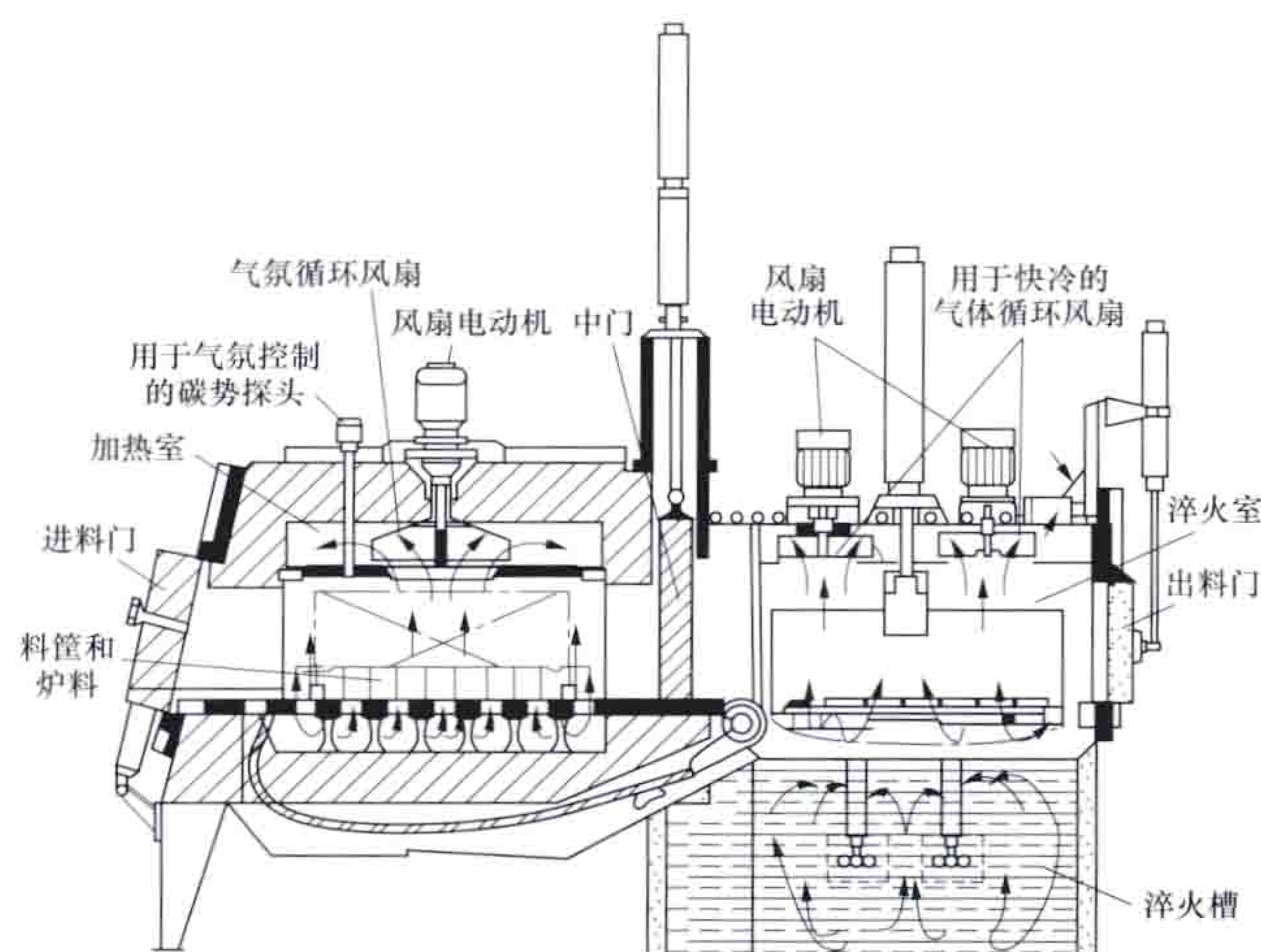


图2　密封箱式气体渗碳炉结构

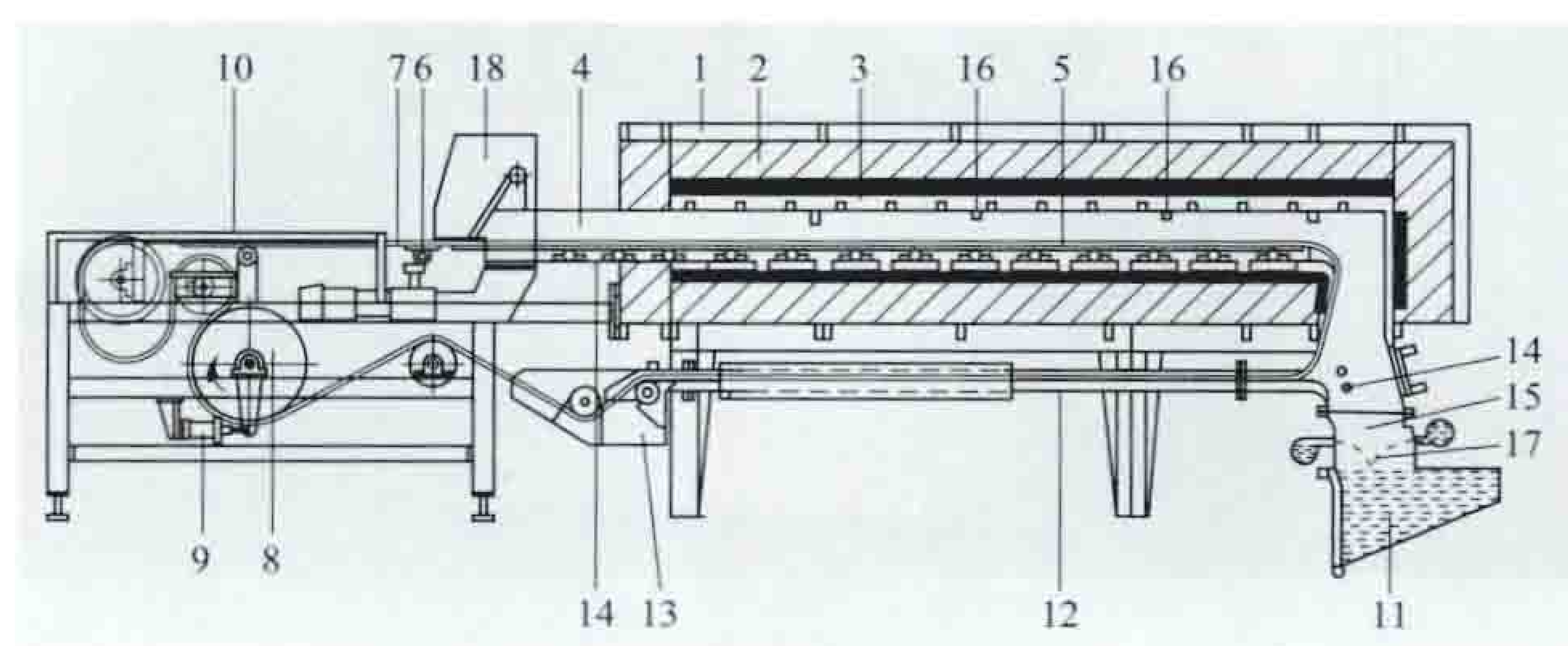


图3　网带式光亮淬火炉结构

1—钢制外壳；2—隔热层；3—加热室；4—气体密封马弗罐；5—活动炉底板；6—炉底板驱动机构；7—网带；8—驱动鼓轮；9—驱动鼓轮机构；10—装料台；11—淬火槽；12—网带退回通道；13—水封；14—气体进口；15—滑道；16—高温计管；17—淬火剂帘幕；18—火焰帘幕

气氛控制方法　对于仅用于保护加热的控制气氛，根据被保护加热工件的要求，将气体按一定成分、配比和流量送入炉内，并基本维持其流量不变直到完成整个工艺过程。如对低碳钢退火进行保护加热，按要求的纯度及流量通入氮气进行保护，以减少钢材的氧化，有时为了减少脱碳，还加入一定数量的甲醇。

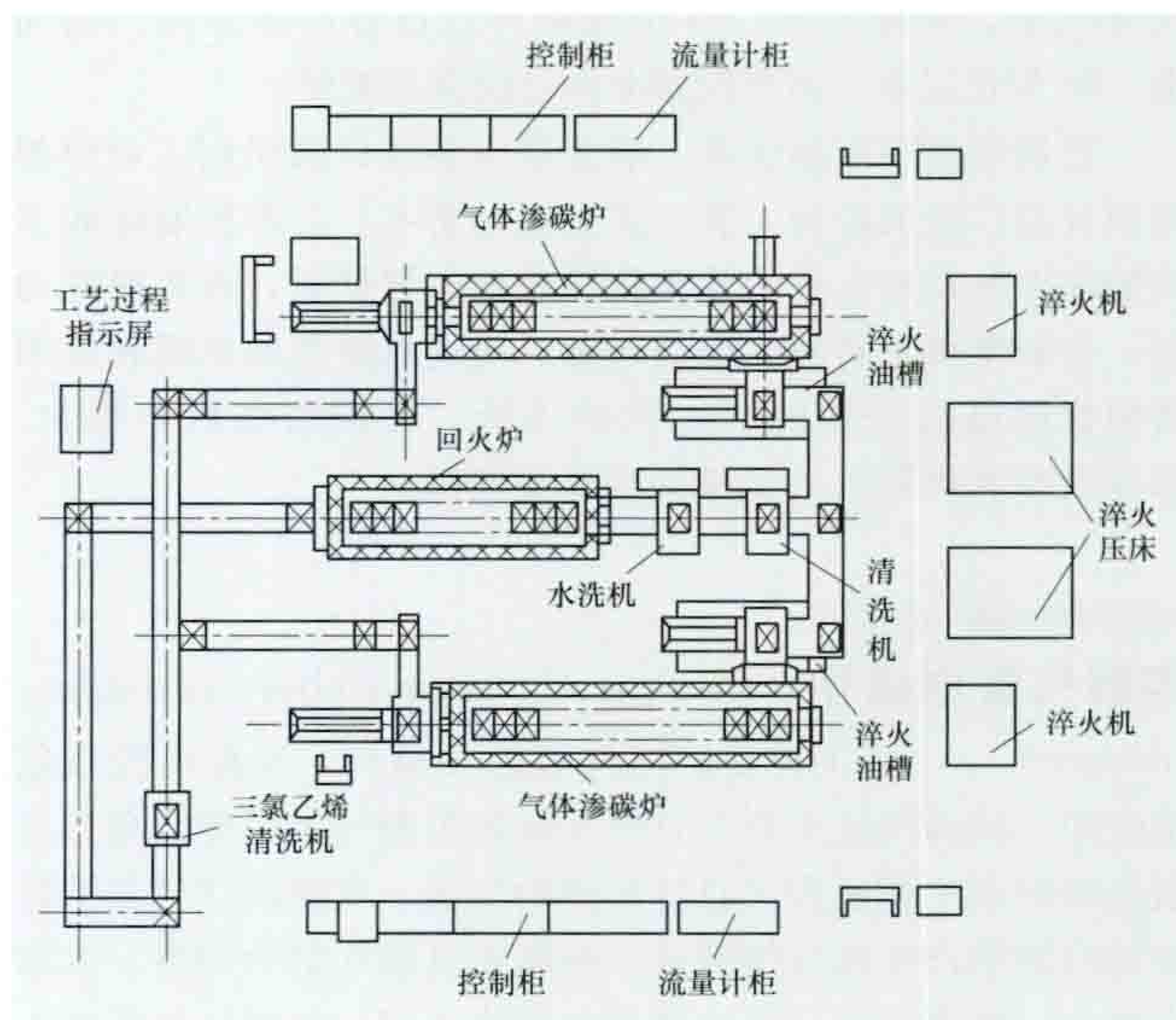


图4　汽车齿轮气体渗碳生产线成套机组

对于用氢作保护气氛进行加热的电阻炉，如高温氢气钼丝烧结炉，不但要对各加热区的氢气流量、压力与炉子机械动作随机进行调控，而且要保证炉压在烧结过程中永远保持在正压状态，还要不断地调节平衡气氛的流量。由于氢为一种易燃易爆气体，所以在生产过程中必须对其进行严格的调控，以防止空气进入炉子低温区发生爆炸。

对于向被加热工件渗碳、氮或其他元素的控制气氛，不但要检测炉气成分，而且要根据工艺要求对炉气成分进行控制。其中以渗碳、氮化学热处理应用最为广泛。

渗碳气氛及控制　向炉内通入碳氢化合物并能在高温下产生活性碳原子的气氛称为渗碳气氛。活性碳原子不但可以渗入工件表面而且还不断地向内扩散，通过淬回火工艺处理，提高工件表面的硬度、耐磨性以及抗疲劳性能。此种化学热处理工艺历史最悠久，使用最广泛，发展最迅速，也是最为先进的工艺。渗碳气氛一般由碳氢化合物（如甲烷、丙烷、丙酮、甲醇、乙醇、异丙醇、醋酸乙酯、煤油等）与稀释性气体在高温下裂解而成，所产生的气氛主要由H_2、CO、CO_2、N_2、H_2O、CH_4和[C]组成。这些成分之间可发生多种反应，但只要控制其中的一个或两个参数，就可以在某一温度下实现碳势控制。其控制方法主要有经验控制、露点控制、红外线气体分析仪（简称红外仪）控制、电阻法控制和氧势控制。除电阻法外，其余均是通过间接测量气氛中的一种或几种成分，通过计算得到气氛的碳势并进行控制，其中以红外仪控制和氧势控制比较成熟和稳定。20世纪90年代后氧势控制技术发展迅速，是使用最多的气氛控制方法。

(1) 经验控制。早期使用的一种方法，大多是根据生产实践总结出的一套控制方法，主要控制渗碳剂的滴入量，即根据不同的炉型，在某一渗碳温度下（一般多在920℃左右），控制丙酮、煤油或甲醇的滴入量。此种方法已很少

采用。

(2) 露点控制。气氛中水汽的含量越少，则结露点（由水汽变成液态水）的温度越低。露点控制是抽取炉内气氛的气样，测定出其露点（结露点）温度，得到气氛中水的浓度，经过化学反应平衡计算及修正，确定出渗碳气氛的碳势，再根据要求调节通入的C_mH_n的量，达到控制渗碳的目的。但由于露点测试时间长（10min左右），调节反应慢且滞后，因此要求气氛成分稳定，调节和变化量小。露点控制较经验控制有所进步，但控制水平不高。

(3) 红外线气体分析仪控制。由于单原子气体（如Ar、Ne、He、Kr等）以及相同原子的双原子气体（N_2、H_2、O_2等）不吸收红外线，只有极性气体分子（CO、CO_2、CH_4等）才吸收红外线，而且它们在吸收红外线时，不是全部吸收，只是吸收某一个或几个波长的红外线，其余波长的红外线则从气体层透过。当红外线光源发射的能量不变，分析室气层厚度不变时，透过气层的红外线能量只与气体的浓度有关，只要测量出透过气层的红外线能量，便可知道该气体的浓度，这就是红外线气体分析仪的工作原理。应用最早最广泛的是CO_2红外仪，首先用抽气泵将炉气抽出，经过滤及干燥除水后经流量计进入红外仪对炉气中CO_2含量连续自动测量、记录，同时将测定的CO_2信号送到调节器。在调节器的前置级设有可以由操作者按炉内气氛碳势要求预先整定的CO_2定值器，当红外分析的CO_2信号与定值器预定的CO_2值有偏差时，通过调节器的比例演算输出与偏差大小相对应的脉冲式调节信号，指令执行机构电磁阀动作，调节通入炉内碳氢化合物的量，达到控制炉内碳势的目的。红外仪气体分析和测量反应快（30s左右），且可连续测量和精确控制，是20世纪七八十年代应用最为广泛的控制手段。

20世纪80年代后期，由于计算机技术的迅速发展，出现了对CO_2、CO、CH_4气体成分的2种或3种同时进行测量控制的双因素、三因素控制。一般渗碳气氛由CO、CO_2、H_2、H_2O、CH_4、O_2和[C] 7种成分及不参与反应的N_2组成。这些成分发生多种反应，但基本反应只有4种。在等压平衡渗碳体系中，独立变量仅有3个。仅用CO_2控制，称为单因素控制，用其他两个变量进行修正处理或用近似公式代替。在生产实践中，一般多用CO_2红外仪，两因素或三因素控制虽然进行了大量研究，但应用不多。

红外仪取气时必须冷却后才能进入分析室，此时被检测的气体并不能代表炉内气氛，况且，炉内气氛反应也不一定是完全平衡状态，红外仪使用时要不断地使用标准气及零点气进行校核；此外测量反应速度也较慢（30s～1min）。由于以上原因，CO_2红外线自动控制技术在工业生产中作为主控碳势的应用已经很少。

(4) 电阻法控制。将特殊的金属丝插入炉内渗碳气氛中，金属丝被渗碳并很快与炉内气氛的碳势达到平衡，由于金属丝中碳原子的渗入，使其晶格和成分发生变化，金属丝的电阻也相应发生变化，测量出该电阻值的变化即可计算得到气氛中相应的碳势。这种方法属直接测量，精度较高，反应较快、较直观，结构简单，计算过程容易，费用很低。其缺点是经几次使用后，金属丝电阻值发生偏移，重复再现性差，所以需经常更换金属丝。特别是金属丝上一旦沉积有炭黑或金属丝发生氧化，其电阻值与碳势就失去了对应关系，致使测量失效。虽然研究出了一些解决措施，但不是结构过于复杂，就是需要繁杂的人工操作，在生产中使用不方便、不理想。该方法在20世纪80年代末90年代初发展得比较成熟，但应用得很少。

(5) 氧势控制。主要由氧探头和控制系统组成。氧探头结构示意如图5所示。

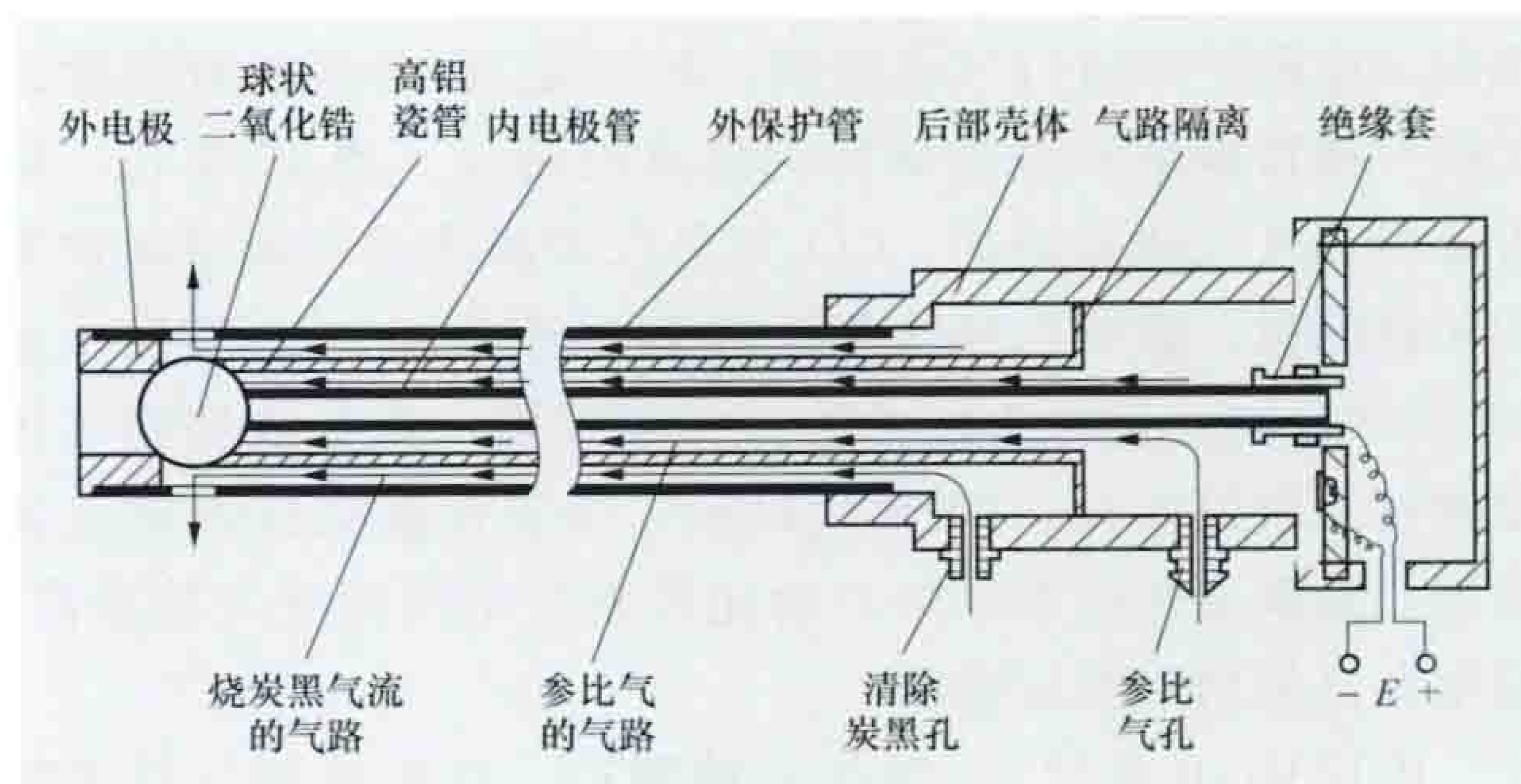


图5 氧探头结构示意图

氧探头是根据固态电解质氧浓度差电池原理制成的。氧化锆是一种金属氧化物陶瓷，在高温下具有传导氧离子的特性。在氧化锆内掺入一定量的氧化钇或氧化钙杂质，可使其内部形成“氧空穴”，成为传导氧离子的通道。在氧化锆电解质球（片）封闭端内外两侧涂一层多孔铂作电极，在高温下（>600℃），当氧化锆球（片）两侧的氧浓度不同时，高浓度侧的氧分子即夺取铂电极上的自由电子，以离子的形式通过“氧空穴”到达低浓度侧，经铂电极释放出多余电子，从而形成离子流，在氧化锆球（片）两侧产生氧浓度差电势。高氧浓度侧为正极，低氧浓度侧为负极。如果探头的温度被控制在某一定值，根据测得的电动势，即可求得被测气体中的氧分压，计算出炉气的碳势。

在气体渗碳炉处于准平衡条件下，根据能斯特公式，可得到氧电势与碳活度及CO分压和渗碳温度的计算式，由于在某渗碳温度下，当炉气稳定时，温度及CO分压保持不变，这样就很容易通过氧电势计算出炉内的碳势。在工业生产中，可采用定碳片来标定氧探头检测的氧电势和实际碳势的准确对应关系，并对碳控仪进行修正。

气体渗碳碳势数学模型不但考虑到渗碳炉内各种气体的化学反应，而且还考虑到钢中各合金元素对钢表面碳含量的影响，只要将钢材的渗层、碳浓度要求及合金元素含量输入计算机，整个渗碳工艺过程便可自动完成。

由于氧探头直接插入炉内，具有结构简单、响应速度快（<1s）、测量精度高等优点，氧探头的碳控仪使用方便，维护简单，使用过程基本上不需调校，是国内渗碳炉碳势控制使用最多的控制方法。

渗氮气氛及控制　将氨气（NH_3）通入530℃左右的渗氮炉内进行裂解，生成氢气和活性氮原子，对工件表面进行渗氮。渗氮后的工件具有更高的硬度、耐磨性，由于表面处于压应力状态，因此具有更高的抗疲劳性能和抗腐性。最初控制氮势的方式是调节氨的流量、炉压，并用玻璃氨分解率测定仪进行调整。在生产中采用可控渗氮微型计算机控制系统，用热导式氢分析器测定炉气中的氢分

压，在微型计算机中将氮势给定值换算成与其对应的氢分压给定值，再与测量的氢分压值进行比较，得出偏差的大小与极性，求出此偏差相对应的控制量，经转换后控制电磁阀的开度，从而调节氨流量，达到控制氮势的目的。

历史与发展 控制气氛早在19世纪中期就已得到应用。1850年英国出现气体保护无氧化加热技术。1880年提出氢气保护钢材装箱退火法。1925年英国人H.H.莱克（H.H.Lake）获得木炭气体发生装置专利。1925年美国在滚筒式电阻炉中进行气体渗碳。20世纪30年代已有连续式无罐气体渗碳炉和测量碳势的露点控制仪。到60年代，随着密封箱式气体渗碳炉，CO_2红外仪和滴注式气体渗碳炉等的相继问世，控制气氛电阻炉得到迅速发展。70年代中期到80年代初，氧探头技术的开发与发展，使氧势控制气体渗碳技术得以实现。90年代以后，由于计算机技术的飞速发展，渗碳工艺过程氧势自动化控制技术得到极大的提高，应用上已相当完善与成熟。

中国从20世纪50年代开始制造、应用控制气氛电阻炉。60年代成功地制造出吸热式和放热式气体发生装置以及氨分解气体发生装置，并用露点仪进行气氛的测量和控制，同时研制了密封箱式气体渗碳炉及其CO_2红外仪控制装置。70年代初又研制成功无罐推送式气体渗碳炉生产线及其碳势控制系统。80年代初CO_2红外仪及其控制系统技术日渐成熟，并用于各种井式、密封箱式以及推送式等气体渗碳炉上。同时对渗碳炉气氛控制理论和应用技术也进行了大量研究，尤其是在气体渗碳数学模型的建立上取得了进展，其理论和试验水平都达到了较高的水准。80年代通过引进、合作生产等方式吸收了其他国家的先进制造技术，使中国的控制气氛电阻炉的制造和配套水平有了一个飞跃。90年代以后，由于计算机技术的发展和节能耐火材料的应用，使控制气氛电阻炉在碳势控制、节能环保、生产自动化水平和产品质量控制方面更加完善、可靠和先进。

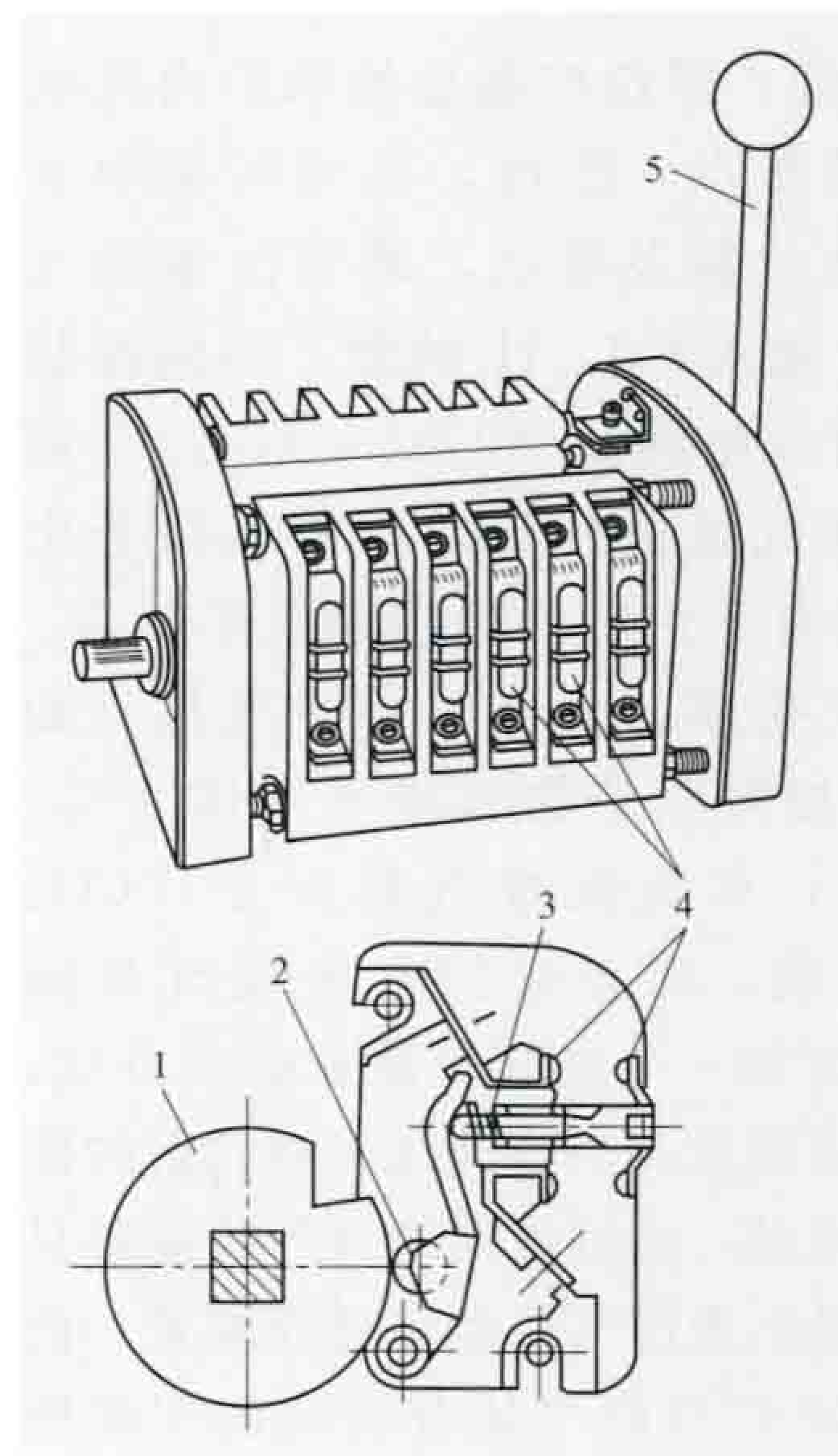
kongzhiqi

控制器

（controller） 按照预定顺序改变主电路或控制电路的接线和改变电路中的电阻值来控制电动机的起动、调速、制动和反向的主令电器。控制器分为凸轮控制器和主令控制器两种。控制器由操动机构、凸轮、触头系统及壳体等部分组成。主令控制器结构如图所示。操作手柄或手轮转动时带动凸轮轴转动，凸轮轴上安装了形状或位置不同的凸轮，操动机构中有定位棘轮，使凸轮轴只能定位在规定的挡位上。凸轮轴转动时使触头组按规定程序分合，以控制电动机的运行。金属壳体作支承骨架和安全防护用。

凸轮控制器的触头系统可直接通断主电路，相对而言通断电流较大，触头系统可带灭弧室。凸轮控制器的尺寸及操作力也不小，但一般只能用于控制容量不大于30kW的中、小型电动机。

主令控制器与凸轮控制器不同的是它的触头系统设计成只能用来控制接触器，再用接触器控制电动机的各种运行。由于主令控制器不直接控制电动机的主电路，所以受控电动机容量不受限制。因接触器线圈的功率不大，所以主令控制器的触头系统不带灭弧室，操作力不大，整个尺寸相对较小。主令控制器按凸轮能否调节分为凸轮调整式和凸轮非调整式。前者的凸轮片上开有小孔和槽，使之能根据规定的触头关合图进行调整；后者的凸轮只能根据规定的触头关合图进行适当的排列与组合。成组的凸轮通过螺杆与对应的触头系统联成一个整体，其转轴既可直接与操动机构连接，也可经过减速器与之连接。



主令控制器结构

1—凸轮；2—棘轮；3—弹簧；4—桥式触头；5—操作手柄

如果被控制的电路数量很多，可将触头系统分为2～3列，并通过齿轮啮合机构来联系，以免主令控制器过长。主令控制器还可组合成联动控制台，以实现多点多位控制。配备万向轴承的主令控制器可将操作手柄在纵横倾斜的任意方位上转动，以控制工作机械（如电动行车和起重工作机械）作上下、前后、左右等方向的运动，操作控制灵活方便。

kongzhi yu baohu kaiguan

控制与保护开关

（control and protective switching devices） 同时具备手动控制和自动控制操作装置，能接通、承载和分断正常及非正常（如短路）条件下电流的开关电器。控制与保护开关（见图）集成了隔离器、断路器或熔断器、接触器、过载（或过电流）保护继电器、欠电压保护继电器等电器元件的主要功能，具有远距离自动控制和就地人工控制功能、机电信号报警功能、协调配合的时间-电流保护特性。各种保护特性、控制动作功能在产品内部协调配合，具有自配合性能。



控制与保护开关

控制与保护开关同时具有保护电器和控制电器的双重功能，特别适用于：冶金、煤矿、钢铁、石化、港口、船舶、铁路等领域的电动机控制与保护系统；现代化建筑中的照明、电源转换、泵、风机、空调等电气控制与保护系统；智能化电控系统或要求高分断能力的电动机控制中心；工厂或车间的单机控制与保护（相当于动力终端）。

控制与保护开关的优势主要体现在：

（1）具有控制与保护自配合特性。集控制与保护功能于一体，很好地解决了分离元件之间的保护与控制特性匹配问题。

（2）具有较高的运行可靠性和系统的连续运行性能。在承受不小于1500次的AC-44电寿命后，紧接着承受分断额定运行短路电流，在这之后仍具有不小于1500次的AC-44电寿命的能力，极大地提高了系统的运行可靠性和系统的连

续运行性。

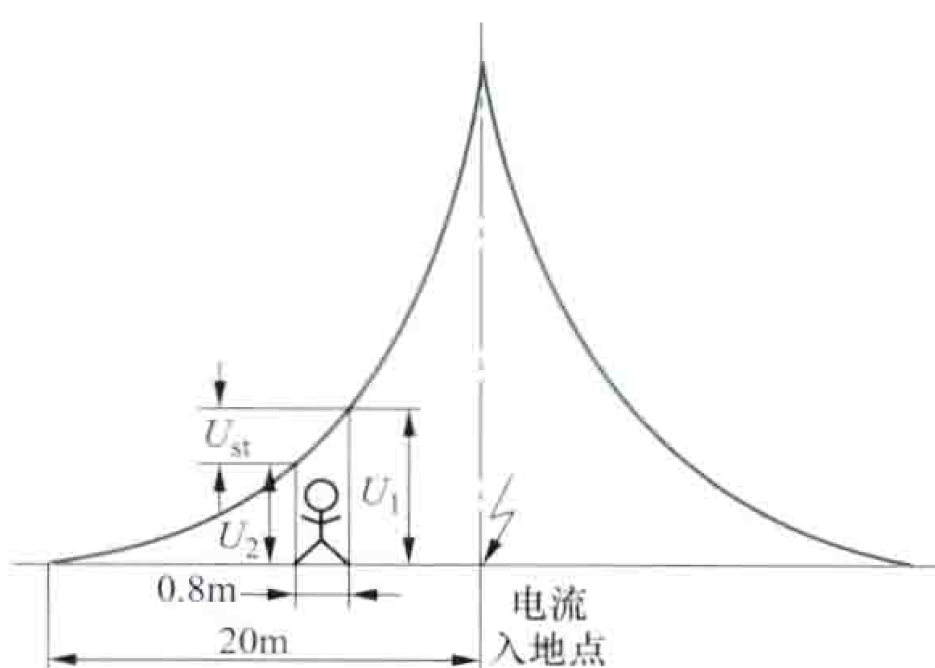
(3) 分断能力高、飞弧距离短。控制与保护开关为双断点结构，采用限流分断技术，其额定运行短路分断时间很短，限制了短路电流对系统的动、热冲击。

(4) 安装角度灵活。垂直安装、水平安装均不影响使用性能，可广泛应用于紧凑型成套装置中，包括固定式或抽屉式的控制柜。用于15～22.5kW电动机控制时，可在1/4和1/2抽屉中使用，具有分离元器件不可比拟的优越性。

(5) 安全可靠、防护等级高。可配备IP65防护等级的外壳，特别适用于民用建筑的潮湿场所、水泵房以及煤矿、港口、船舶、石化等领域，可替代电磁起动器、保护式和组合式起动器等产品。

kuabu dianya

跨步电压 (step voltage) 人活动在具有分布电位的地面时，两脚之间所承受的电位差。电流通过接地装置向大地流散时，在大地表面上形成以电流入地点为中心的分布电位。此时，人走在具有分布电位的地面上，两脚间约一步距离的两点间的电位差即为跨步电压 U_{st}（见图）。跨步电压主要产生于接地短路电流，也可能来自雷电流。跨步电压造成的人体触电属间接触电。



跨步电压示意图

跨步电压数值和人体与电流入地点的距离以及跨步大小有关，$U_{st}=U_1-U_2$。人的跨步一般按0.8m考虑。人体距离电流入地点越远，跨步电压数值越小；当离开电流入地点20m以外时，跨步电压接近于零；越接近，则跨步电压越大。其数值不允许超过规定的安全电压。

降低跨步电压的措施有：①深埋接地极；②采用网状接地装置，并缩小接地网的间隔；③敷设水平均压带。

kuangjing tishengji diankong xitong

矿井提升机电控系统 (electric drive control system for mine hoist) 用以实现矿井提升机正常运转的电力拖动和控制等电路组合的总体。矿井提升机（也称矿井卷扬机）是一种位势负载的生产机械，即不论运动方向如何，重力作用总是向下。这类机械具有短时重复工作、正反向频繁交替运行的特点，除需满足所规定的速度图（提升或下降速度随时间的变化曲线）及力矩图（电动机力矩随时间的变化曲线）以外，还需避免钢丝绳承受过度的拉力或钢丝绳发生打滑（对多绳提升机而言）。因而，要求电力拖动装置必须运行平稳，调速性能好，具备电动机在四个象限运行的工作状态；无论是轻载还是重载，提升还是下放，其过渡过程应平滑，没有冲击。

矿井提升机的电控系统包括电力拖动主回路，调速系统，运行、保护、故障处理等操作联锁线路等。其运行、保护、故障处理等操作联锁线路可以用继电型设备实现，也可借自诊断手段以微机来实现。其调速系统则依电力拖动方式的不同分为交流传动调速系统和直流传动调速系统。

采用转子串电阻调速的交流传动系统，其线路虽简单，但调速性能差，效率低，只适用于中小容量和性能要求不高的矿井提升机。对大容量或性能要求高的提升机，直流传动一度占据主流位置。随着交流调速技术和电力电子、现代控制理论的发展，大容量、高性能的交流传动系统已经逐步取代了直流调速系统，交流传动系统已成为矿井提升机电力拖动系统的主流。

直流传动调速系统　矿井提升机的直流传动系统有发电机-电动机传动系统与晶闸管整流器-电动机传动系统两种。后者与前者相比有运行效率高、体积小、易于维护等优点。但晶闸管供电装置的运行功率因数低，对电网无功冲击大，产生的高次谐波影响电网电压波形，因此必须根据电网容量相应采取所谓“顺序控制”、12脉动/24脉动供电以及电网补偿的方法来加以改善。

直流传动调速系统采用典型的电流及速度双环系统。加入电流及速度闭环控制环节，可以改善电流环品质并获得较好的速度调节性能。

交流传动调速系统　矿井提升机的交流传动调速系统有绕线转子感应电动机转子串电阻调速系统、感应电动机变频调速和同步电动机变频调速系统等。

(1) 绕线转子感应电动机转子串电阻调速系统。在绕线转子感应电动机的转子回路内接入电阻，用切除电阻的方法进行调速（见转子串电阻交流调速）。制动时，感应电动机的定子绕组从交流电网切除，并接入直流电源，提升机储藏的动能将转变成电能消耗在转子回路外接的电阻上，因此，这种制动叫能耗制动，又叫动力制动。随着外接电阻逐级减小，提升机的转速将逐渐降低。

单纯的动力制动装置满足不了提升机要求的稳定爬行速度。为获得稳定的爬行速度采取的措施有加装一套微电动机（小容量的绕线转子感应电动机）拖动装置、外加低频机组或晶闸管低频电源等（见交流电动机制动）。

(2) 感应电动机变频调速系统。高性能的感应电动机变频调速系统，采用闭环控制实现对感应电动机转速、转矩的精确控制（见转速控制、转矩控制），采用具有四象限工作能力的变频器实现能量的回馈。由于感应电动机的低速调速性能比同步电动机要差一些，所以感应电动机变频调速的矿井提升机系统中一般有减速器。

(3) 同步电动机变频调速系统。高性能的同步电动机传动系统尤其适合低速工作，在驱动提升机械时，可取消减速器变为直接传动方式。由于交流电动机结构简单，还可以进一步把电动机制成外转子形式，让外转子作卷筒，使机电合为一体，大大提高了可靠性，减轻了设备重量。

kuixian zidonghua

馈线自动化 (feeder automation, FA) 中压配电线路故障定位、隔离与恢复供电的自动化。当配电线路发生相间短路故障或中性点经小电阻接地系统中发生单相接地短路故障时，自动判断、隔离故障区段并恢复对非故障区段用户的供电，能够减少故障停电时间，缩小停电范围，提高供电可靠性，避免或减少中压配电线路故障给用户带来的停电损失。实现馈线自动化的前提条件是：使用分段开关将配

电线路合理分段、分段开关配置电动操作机构以及必要的电压/电流互感器或传感器、环网供电线路具有足够的备用容量以支持负荷转供。

分类　根据是否需要通信、使用的分段开关类型（负荷开关、断路器等）、检测的故障信号（电压、电流）等条件，有不同的实现方式，具体可分为就地控制型、集中控制型、分布式智能型3种。

就地控制型FA　由安装在变电站线路出口的自动重合器（或配置保护的断路器）与线路上的自动分段器按照预先设定的逻辑顺序动作，完成故障定位、隔离与非故障区段恢复供电。该方式既不需要通信通道，也不依赖于配电网自动化系统主站。由于需要多次重合到故障上，对系统形成多次冲击，主要用于对供电质量要求不是太高、没有通信条件的城郊或农村架空配电线路。根据利用自动重合器与自动分段器检测电压和（或）电流信息的具体形式，分为电压控制型、电流控制型和电压电流控制型3种实现模式。

（1）电压控制型FA。又称电压-时间控制型FA。其工作原理是通过检测自动分段器两侧的电压来控制其分闸与合闸。在线路发生短路故障时，变电站电源出口自动重合器分闸，随后线路上的自动分段器因失压而分闸；经过一段时间后自动重合器第1次合闸，线路上的自动分段器按照来电顺序依次延时重合。如果故障是瞬时性的，线路恢复正常运行；如果故障是永久性的，自动重合器和自动分段器第2次分闸，故障点上游的自动分段器自动闭锁在分闸状态，再经过一段时间后，重合器第2次合闸恢复故障点上游非故障区段供电。

辐射式架空配电线路电压控制型FA系统如图1所示，由电源出口自动重合器R与线路上的自动分段器Q1、Q2组成，自动分段器的控制器由电压互感器提供电压检测信号。自动重合器R第1次重合时间整定为15s，第2次重合时间整定为5s。自动分段器Q1、Q2工作在“动断”状态，在开关两侧没有电压（失压）时立即分闸，在一侧有电时经过X时限（合闸延迟时限）合闸；合闸后在一预定Y时限（故障检测时限）内如再一次检测到失压，说明下一段线路有故障，分闸后闭锁。设定的时限X大于Y，以保证上一级开关可靠检测并切除故障，通常将Q1、Q2时限整定为$X=7s$、$Y=5s$。

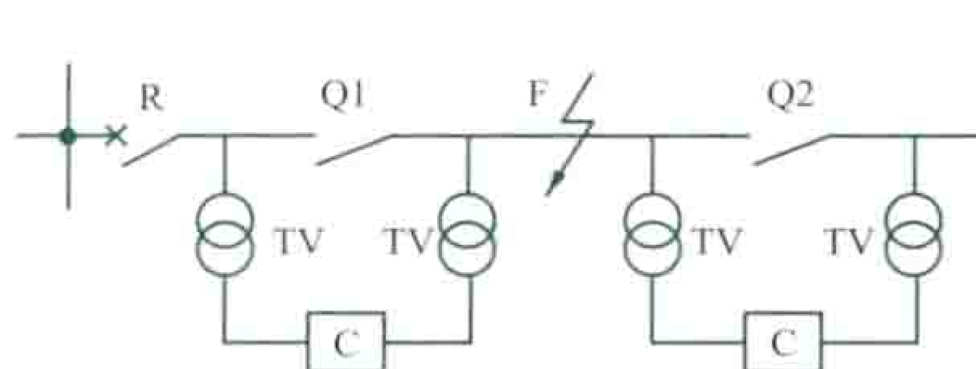


图1　辐射式架空配电线路电压控制型FA系统

C—控制器

在图1所示系统中，假设在F点发生故障，R分闸，Q1、Q2均因两侧失压分闸。延时15s后R重合，Q1在来电后延时7s合闸，若为瞬时性故障，则Q1合闸成功，Q2在来电后延时7s合闸，恢复线路供电。若为永久性故障，Q1合到故障上导致R再次分闸；由于Q1在合闸后未达到故障检测时限（$Y=5s$）就又检测到失压，因此失压分闸后闭锁。R在分闸后延时5s，第2次重合，由于Q1已处于闭锁状态，不再合闸，从而隔离了故障区段（Q1与Q2之间），恢复R与Q1之间的区段供电。F点永久性故障时R与Q1、Q2的动作时序如图2所示，t为自动分段器分闸延迟时间。

电压控制型FA在用于带分支线路的辐射式架空配电线路的故障隔离时，为正确区分主干线路与分支线路故障，需要将分支线路下游主干线路自动分段器的合闸延迟时限X增加一倍。在用于“手拉手”架空环网线路时，作为联络的自动分段器处于“动合”状态，在检测到一侧带电而另一侧不带电时延时合闸，设定较长的合闸延迟时限，以保证只有在主供线路上自动重合器与自动分段器动作完毕后才开始合闸。

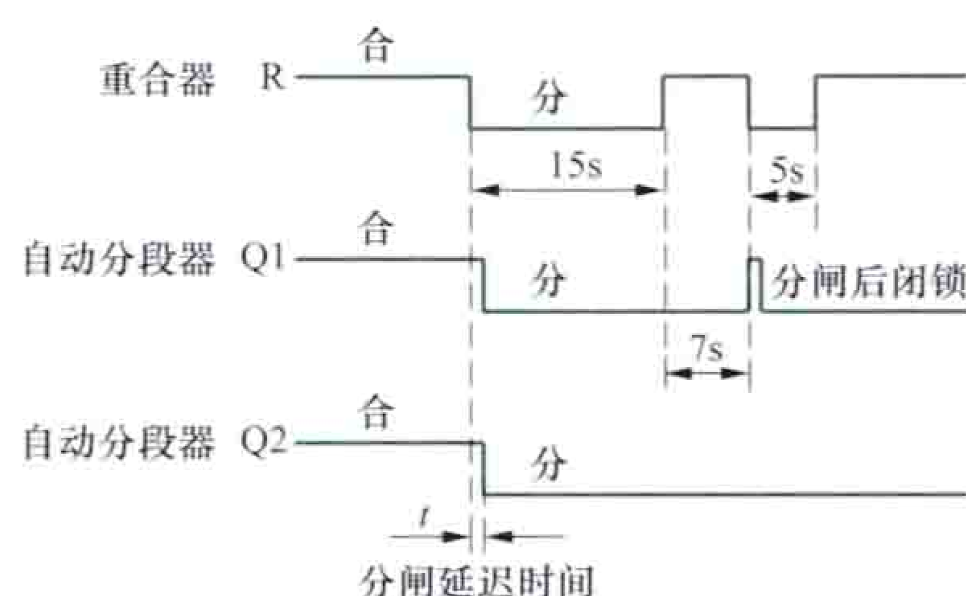


图2　单点永久性故障时自动重合器与自动分段器动作时序

（2）电流控制型FA。又称过流脉冲计数型FA。其工作原理是自动分段器在连续计数到2次及以上故障电流后分闸隔离故障。在线路发生故障时，变电站电源出口自动重合器分闸，自动分段器维持在合闸状态；自动分段器的过流脉冲计数器计数经历故障电流的次数，当计数次数达到设定值时，自动分段器在无流状态下分闸；当自动重合器再次合闸后，故障区段被隔离，恢复非故障区段供电。

辐射式架空配电线路电流控制型FA系统如图3所示，由电源出口自动重合器R与主干线路上的自动分段器Q1、Q2以及分支线路上的自动分段器Qb组成，自动分段器的控制器由电流互感器提供过流检测信号。设定R计数到4次过流后闭锁，Q1计数到3次过流后分闸，Q2与Qb计数到2次过流后分闸。

假设L3区段发生故障，若为瞬时性故障，R分闸，Q1与Q2均计过流1次，由于均未达到设定的过流次数，仍保持在合闸状态；经过一时限后R第1次重合，由于故障已经消失，从而恢复线路的正常供电；Q1与Q2经过一时限后计数器清零，为下一次故障做好准备。若为永久性故障，R分闸，Q1与Q2均计过流1次；经过一时限后R第1次重合并分闸，Q2计数过流达到2次自动分闸，由于Q1计数次数尚未达到设定值（3次）仍保持合闸状态；再经过一时限后R第2次重合，由于故障已经被隔离，故重合成功，恢复非故障区段L1、L2和Lb供电。

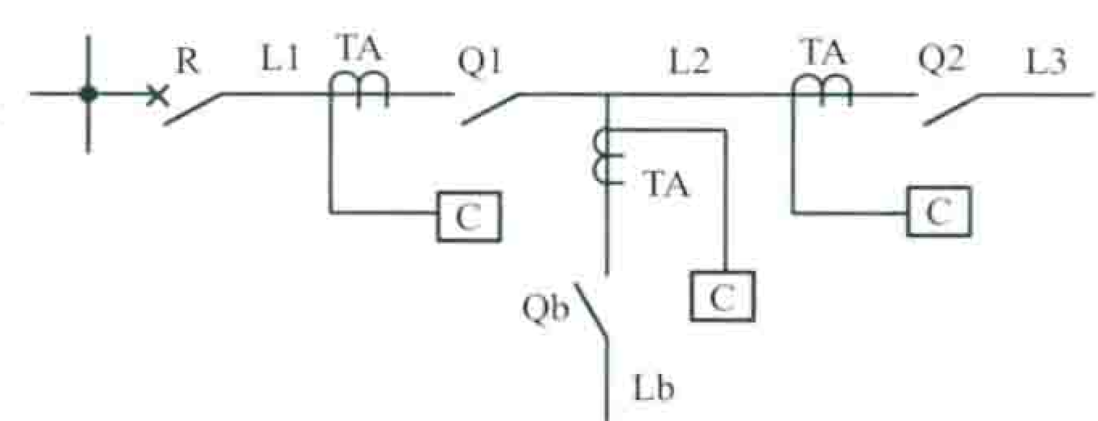


图3　辐射式架空配电线路电流控制型FA系统

根据以上工作原理，在L2区段永久性故障时，R需第3次重合才能恢复线路区段L1的正常供电。在分支线路Lb区段故障时，故障处理过程与L3区段的类似，在R第2次重合后恢复主干线路供电。

由上述电流控制型馈线自动化动作过程得知，重合器的动作次数随着分段开关数目的增多而增加。为避免重合器动作次数过多，主干线路分段不宜太多，一般不超过2段。另外，由于电流控制型自动分段器没有电压检测功能，无法利用备供电源恢复故障下游非故障区段的供电。

(3) 电压电流控制型FA。又称电压-电流-时间控制型FA。其工作原理是自动分段器采用断路器并同时检测开关两侧电压与电流信号，在重合到故障上时立即分闸闭锁隔离故障；变电站电源出口自动重合器采用限时电流速断保护。(见配电网电流保护)

集中控制型FA 由配电网自动化系统主站（或配电网自动化系统子站）集中处理配电网自动化系统终端的故障检测信息，根据系统拓扑结构和预设算法自动进行故障定位、隔离与非故障区段恢复供电。该方式不要求变电站电源出口断路器进行重合闸配合，不会对系统造成多次过流冲击，适用于城市对供电质量要求较高区域的架空配电线路或配电电缆线路。由于故障信息传递、处理以及与调度自动化系统交换变电站电源出口断路器数据均需占用时间，自动供电恢复时间较长，通常在1～3min。

在配电网自动化系统主站（或子站）运行馈线自动化软件模块，完成故障定位、隔离与非故障区段恢复供电。随着配电网自动化系统主站技术的日趋成熟，已很少使用配电网自动化系统子站实现馈线自动化。在线路发生短路故障后，变电站电源出口断路器分闸，配电网自动化系统终端将线路失压、过流等故障信息通过配电网自动化通信系统发送到配电网自动化系统主站，由主站根据配电网的实时拓扑结构、故障信息以及变电站电源出口断路器的信息按照一定的逻辑算法确定故障区段，并且给出最优的故障恢复方案，以自动或人工参与的方式操作相关的开关设备，隔离故障区段，恢复非故障区段供电。①故障定位、隔离。通常采用电流比较法确定故障区段，即检查流过一个区段的故障电流是穿越性的还是注入性的，将故障电流是注入性的区段确定为故障区段。确定故障区段后，打开故障区段两端的分段开关，隔离故障。②非故障区段恢复供电。故障区段被隔离后，其上游的非故障区段由变电站电源出口断路器合闸恢复供电；如果故障点下游的非故障区段有联络电源，则由联络开关合闸恢复供电。故障点下游的非故障区段恢复供电应按照保证联络线路负荷不超过额定容量、恢复容量最大、重要用户优先、负荷均衡、开关操作次数少等原则进行。

分布式智能型FA 配电网自动化系统终端通过对等通信网络交换故障检测信息，实现自动故障定位、隔离与非故障区段恢复供电。互相之间能够对等交换信息、支持分布式智能控制应用的配电网自动化系统终端称为智能终端(smart terminal unit，STU)。故障检测信息与控制信息在相关智能终端、变电站电源出口断路器保护装置之间传递，故障信息的处理与控制决策由智能终端和保护装置自身完成，无需配电网自动化系统主站参与协调与控制，能够在数秒内快速隔离并恢复供电，适用于接有重要负荷的架空配电线路或配电电缆线路。

展望 随着分布式电源的大量接入，传统的配电网变成功率双向流动的有源配电网，在发生短路故障时，分布式电源向故障点注入短路电流，使故障点下游开关也有短路电流流过，传统的故障检测方法将不再有效。未来将在充分考虑分布式电源对故障定位、隔离与非故障区段恢复供电方法的影响的基础上，进一步研究适应有源配电网的故障检测方法，如采用电流差动与方向比较方法。

见配电线路纵联保护。



laji fenshao fadian

垃圾焚烧发电 (waste incineration power generation)

通过燃烧垃圾产生热能驱动蒸汽轮机发电的技术。垃圾焚烧发电是生物质发电的一种，在利用垃圾能量的同时实现垃圾无害化和高度减量化。图1所示为上海浦东生活垃圾焚烧厂。



图1 上海浦东生活垃圾焚烧厂（位于上海浦东区北蔡镇御桥工业区，日均处理城市生活垃圾1000t）

基本原理 垃圾经分类、预处理后由起重设备送入垃圾焚烧锅炉中燃烧，将垃圾的化学能转换成高温烟气的热能，高温烟气在余热锅炉中产生水蒸气，水蒸气在汽轮机中膨胀做功将热能转换为汽轮机转子的机械能，汽轮子转子带动发电机发电。

主要特点 主要有：①垃圾焚烧发电一般要求垃圾可燃成分低位限值为30%～40%，低位热值高于3350kJ/kg，需对垃圾进行分类处理。②垃圾发电供热锅炉蒸汽参数通常为中温中压（4MPa和400℃），提高蒸汽参数有助于提高余热利用效率，提高发电量，但也加剧了余热锅炉材料的腐蚀，缩短了设备的使用寿命，增加了折旧成本。③垃圾焚烧飞灰中含有大量二噁英，富集了垃圾中的大部分重金属元素（铅、镉、铬等）和易溶盐类，垃圾焚烧渗滤液具有COD高（可达70 000mg/L）、BOD_5/COD高、NH_3-N高、金属离子含量高、水质变化大、毒性大、难处理等特点，应做好二次污染控制。

系统组成 垃圾焚烧发电系统主要包括垃圾储运系统、垃圾焚烧锅炉、汽轮机组、烟气处理系统。垃圾储运系统包括垃圾仓和垃圾起重机。垃圾仓对垃圾进行输送、中转、存放，一般达到7天的垃圾储存能力。垃圾起重机位于垃圾仓上方，承担垃圾的投料、搬运、取物、称量等工作。垃圾发电供热锅炉应用较多、比较成熟的主要有炉排焚烧锅炉、流化床锅炉等。生活垃圾炉排炉焚烧发电系统示意图见图2。垃圾发电厂汽轮机组适合选用额定功率6～12MW、低压段抗水蚀能力强、变工况能力强的中压或次高压凝汽式汽轮机。烟气处理系统是去除烟气中的固体颗粒、硫氧化物、氮氧化物、氯化氢、二噁英等有害物质的设备组合，通常采用的处理技术和设备为半干式反应塔系统配活性炭喷射，并配布袋除尘器。

焚烧技术 包括炉排燃烧技术和流化床燃烧技术。炉排燃烧技术对垃圾的预处理要求不高、垃圾热值适应范围广、运行及维护简便，在欧美等发达国家得到普遍利用，单台最大燃烧规模已达1200t/d。流化床燃烧技术需要进行垃圾预处理而且飞灰产生量大、操作过程气流量大，一般需要掺煤才能焚烧，其收益受煤价波动影响大，运营成本较高，在中国应用较少。

发展概况 1874年英国建成世界第一座垃圾焚烧厂。1895年，德国汉堡建成世界第一个固体废弃物焚烧发电设备。20世纪60年代起，一些发达国家开始利用垃圾焚烧产生的热量进行发电。最早利用垃圾发电的是德国。20世纪80年代，德国已建立16座垃圾焚烧电站，所获得能源占全国能耗的4%～5%。据欧洲垃圾发电企业联盟（CEWEP）2006年统计，全世界生活垃圾焚烧厂共有约2100座，其中生活垃圾焚烧发电厂约1000座。美国自20世纪80年代起，陆续建设几百座垃圾发电厂。1998年，美国底特律垃圾发电厂建成，是当时世界最大的垃圾发电厂，日处理垃圾4000t，发电容量65MW。日本是垃圾焚烧厂数量最多的国家，2012年约有1370座，其中约10%用于发电。中国第一个垃圾焚烧发电厂——深圳市市政环卫综合处理厂于1988年在深圳投入运行，之后垃圾焚烧发电发展迅猛。截至2012年底，中国垃圾焚烧发电并网容量累计达2427MW，占生物质发电并网容量的41.28%。

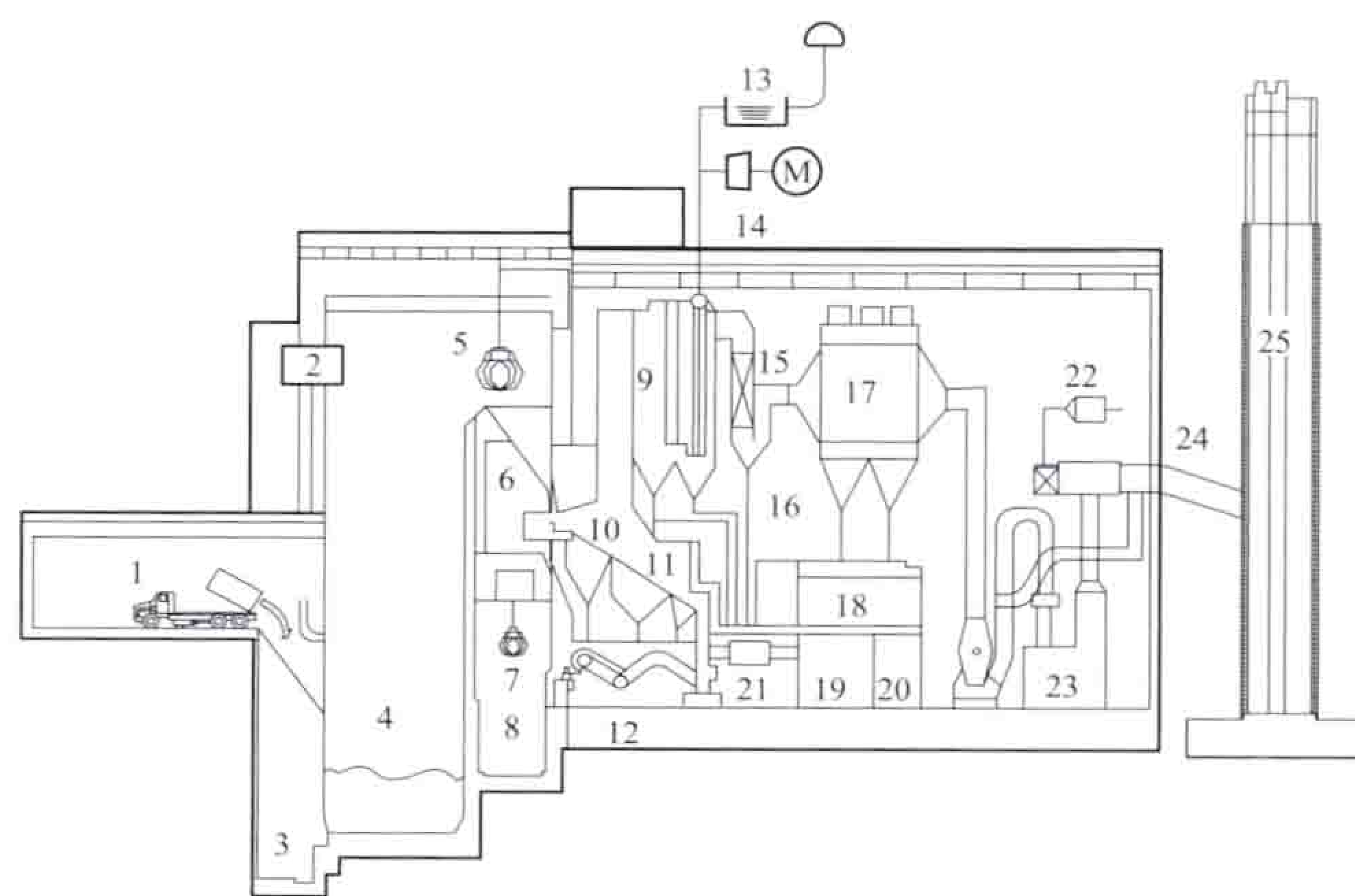


图2 生活垃圾炉排炉焚烧发电系统示意图

1—垃圾倾卸区；2—吊车控制室；3—渗滤液储槽；4—垃圾仓；5—垃圾起重机；6—进料斗垃圾给料机；7—除渣吊车；8—炉渣储坑；9—余热锅炉；10—焚烧炉；11—炉排；12—炉渣输送带；13—温水池；14—汽轮发电机；15—省煤器；16—飞灰输送带；17—袋式除尘器；18—中央控制室；19—空气预热器；20—变电室；21—一次送风机；22—尾气加热器；23—洗涤塔；24—引风机；25—烟囱

lenglianzhaji diankong xitong

冷连轧机电控系统 (electric drive control system for cold tandem mill) 用以实现冷连轧机正常运转的电力拖动和控制等电路组合的整体。冷连轧机是生产冷连轧带钢的机械。它将酸洗除鳞后的热轧带卷，在3～6架串列式四辊或六辊轧机中，于常温下单向一次连续轧制成厚度为0.1～0.3mm的带材。

冷连轧机（见图1）的各机架通过所轧带材耦合成一个相互制约的多变量整体，一旦某机架的干扰量（来料厚度、材质、温度等）或调节量（辊缝、轧制力、速度、张力等）发生变化，既破坏了该架的稳态，也破坏了整个机列的稳态。因此要求冷连轧机电控系统调节快速、协调、平稳，可靠性高，调速范围宽，速度调节精度高（达到相当于最高速度的±0.04%）。

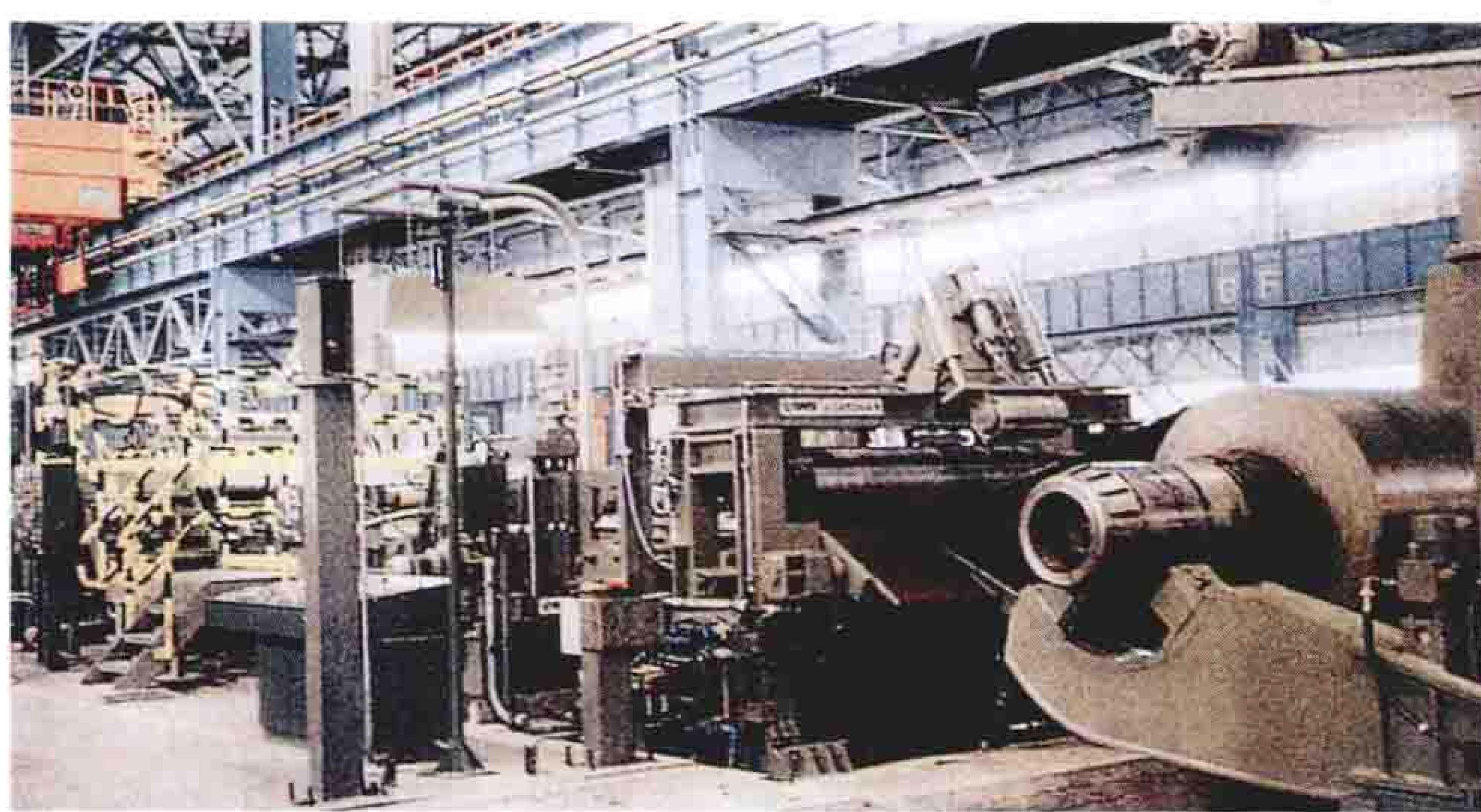


图1 2030mm冷连轧机组

冷连轧机电控系统有主机架电控系统、卷取机电控系统、压下控制系统、厚度控制系统和计算机综合控制系统。

主机架电控系统 主传动多采用晶闸管供电。为了提高快速性，减少转动惯量，对上下轧辊分别用1～3台直流电动机单独传动。冷连轧为单向轧制，正常运转时电动机不需逆转，但为了满足制动和张力调节的要求，主回路仍用可逆系统，其正反组容量可以不相等。整个控制系统有电枢回路控制通道和磁场回路控制通道两个控制通道，它们共同构成一个基速以下调电枢电压、基速以上调励磁磁通的高精度的速度闭环调节系统。为了在宽的速度调节范围内有高的动、静态精度，设有与磁场控制、电枢电流断续相匹配的自适应校正环节，数字式速度给定及转速实际值校正环节。为了提高系统的速度跟随能力，设置动态补偿和空载补偿环节。张力的恒定和调节，靠改变机架间的转速比来实现。为克服穿带引起的电流冲击现象，采取了软化外特性的措施。对由于辊径、辊面、润滑等不同因素造成的上下辊负载不平衡状态，设负载平衡调节回路校正。当换辊时，电控系统变成自动转角位置控制，以使轧辊扁头准确停在指定位置上，误差不大于±2°。图2为冷轧机主机架及卷取机电控系统示意图。

卷取机电控系统 为了提供钢卷整齐卷紧及获取优良板形所需的恒线速度和稳定的张力，电控系统设有两种运行状态：正常卷取时主导调节为张力调节，穿带、分卷剪切和断带时张力消失，系统转为速度调节。在卷取过程中，卷径逐渐增大，同时卷重、飞轮矩也在不断变化。为了与机架的运行协调，

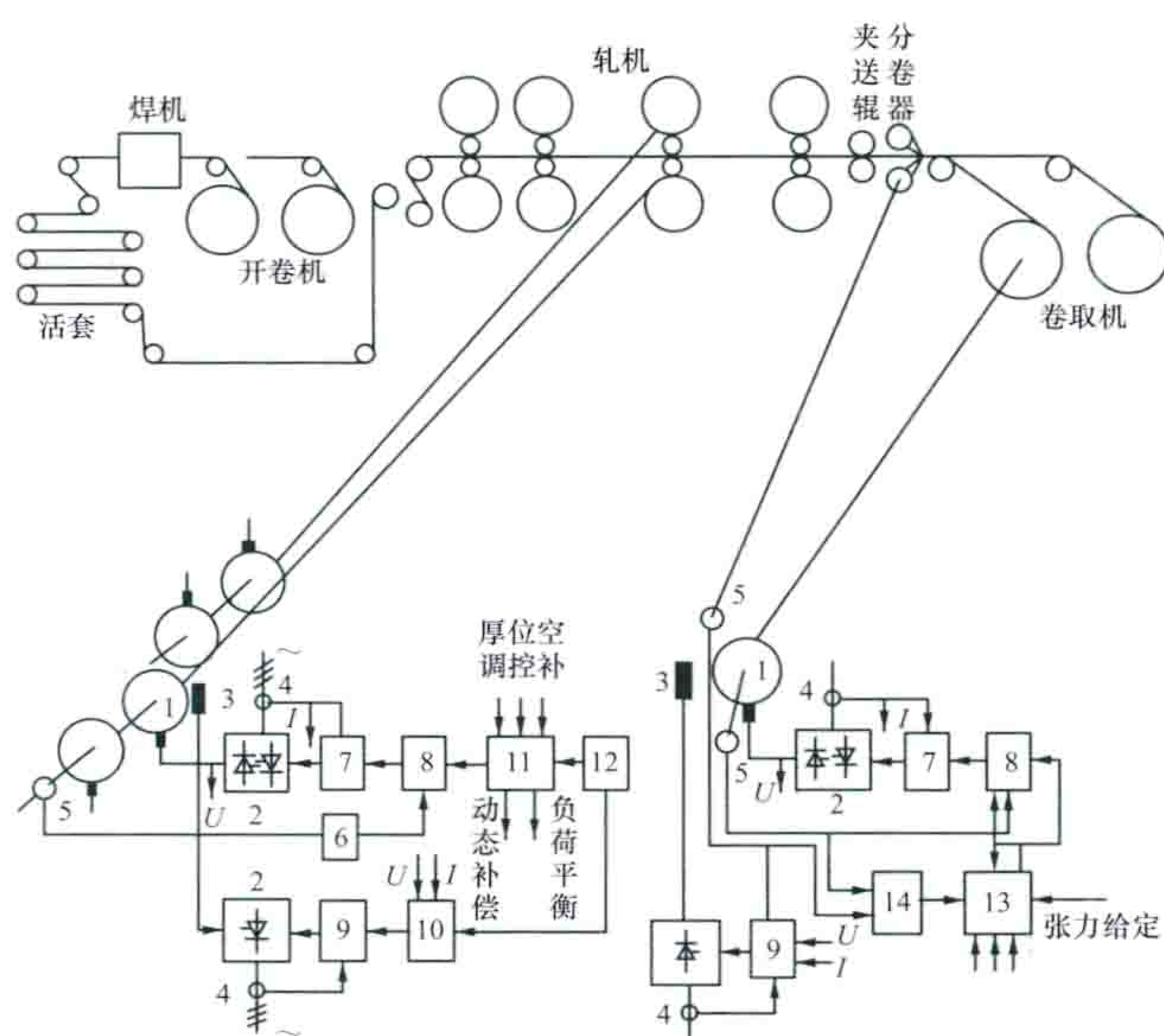


图2 冷轧机主机架及卷取机电控系统示意图

1—直流电动机；2—晶闸管供电装置；3—电机磁场；4—电流检出；5—转速检出；6—转速数字校正；7—电流调节器；8—速度调节器；9—磁通调节；10—电动势调节；11—综合控制；12—数字给定；13—力矩调节；14—卷径计算

要相应降低卷取机的转速。为了避免钢卷外层与内层因卷紧程度的不同而出现的“塌卷”现象，要随着卷径的增大而逐渐降低卷取张力值，降低的数值与带材的厚薄、材质的软硬、卷后是否进行退火处理有关。卷取机电控系统可从张力计取信号进行直接张力控制，具有响应快和简便的特点。

压下控制系统 调整辊缝可改变轧制力，以控制厚度。电-液伺服阀控制的液压缸已取代过去的电动压下螺丝进行位置控制。电动压下的响应时间为0.14～0.2s；而液压压下惯性小，响应时间在0.02s以下，位控更准确，几乎在轧机弹跳同时就给予压下补偿，保持辊缝恒定。位置给定值来自计算机程序，由精度为±2μm的位置传感器提供闭环控制所需的反馈值。位置控制还可校准轧辊的倾斜度，以获得良好板形。用装在液压缸上的压力传感器实测的轧制力，进行轧制力闭环控制。

自动厚度控制系统（AGC） 根据通过各机架金属秒流量恒定的原则设计。按调节手段不同可分为压下AGC（主要有反馈式、厚度计式和前馈式三种控制方式）和张力AGC两类，如图3所示。

反馈式AGC如图3（a）所示，用装在轧机后的测厚仪，直接测出轧制后的实际厚度值h_0并与设定的厚度目标值h_s相比较，用其差值$\Delta h = h_s - h_0$作为计算辊缝调节量Δs的依据。辊缝调节量Δs与Δh的关系为

$$\Delta s = \Delta h\left(1 + \frac{Q}{k}\right)$$

式中Q为轧件塑性系数；k为轧机刚性系数。用Δs连续反馈控制压下装置以使轧件厚度符合公差要求。由于测厚仪距轧辊中心线有一定距离L，故这种厚度控制方式传递信息有滞后现象。

厚度计式AGC如图3（b）所示，用压力传感器和位置传感器测出轧制过程中的辊缝s和轧制力p、空载时设定原始辊缝s_0和轧制力p_s，计算出差值s_0'和$\Delta p/k$，再通过轧

机弹跳方程算出轧件出口实际厚度 h_0，即

$$h_0 = s_0' + \frac{\Delta p}{k}$$

用 h_0 与设定厚度目标值 h_s 比较，算出辊缝调节量 Δs，控制压下装置消除厚差。这种利用测厚计原理的间接测厚方法，实质上是将整个轧机机架作为测量轧件厚度的测厚计，方法简单，没有取样滞后的缺点。但由于有轧辊磨损和热膨胀、轴承间隙等因素可能使测得的辊缝值不准确，影响 h_0 的计算精度，一般需用出口侧的测厚仪信号来不断校正。

前馈式 AGC 如图 3（c）所示。来料厚度波动较大时，严重影响成品厚度精度。为此利用设在机架前的测厚仪（或以前一机架作为厚度计）测出来料厚度 H_0，若它与原先给定的厚度值 H_s 有偏差 ΔH，则用此偏差信息提前调整压下，以获得所要求的轧出厚度。前馈式 AGC 实质是预控 AGC，属于开环控制系统，其控制效果不能单独评价，一般需将前馈式 AGC 与反馈式厚度控制系统结合使用。

张力 AGC 如图 3（d）所示，通过改变机架前后张力值来控制厚度。与压下 AGC 相比，张力 AGC 具有惯性小、反应快、易于稳定等特点。由于带材在轧制中材质硬化，所以一般在冷连轧机头两个机架上采用压下 AGC，可以消除 90%～95% 的厚差，剩余的厚差可以在成品架上用张力 AGC 消除。一般通过控制卷取机和最后两个机架的速度来微调前后张力，以最终完成 AGC 的目标。

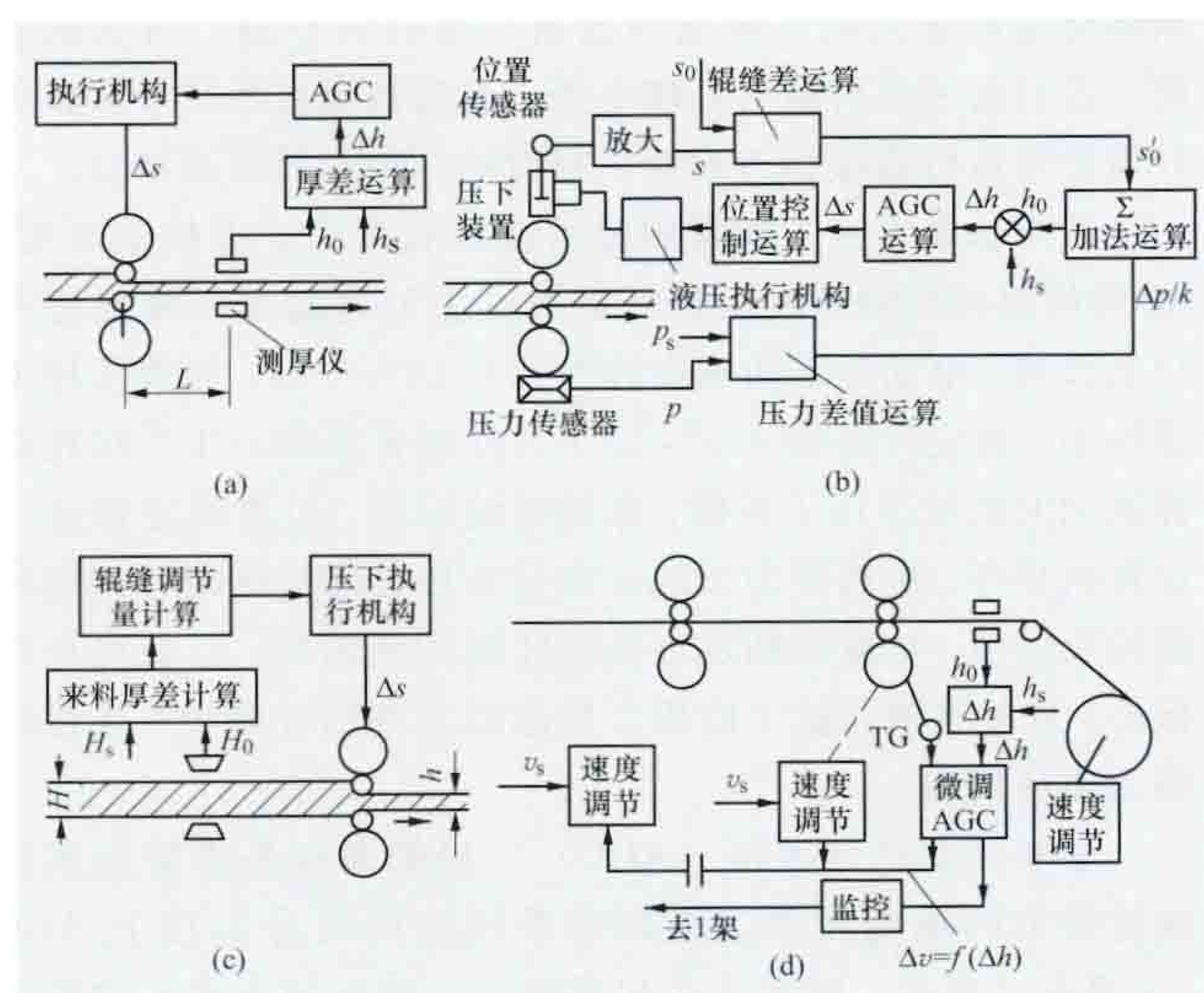


图 3　自动厚度控制系统示意框图

（a）反馈式；（b）厚度计式；（c）前馈式；（d）张力 AGC

计算机综合控制系统　计算机可对轧制过程中的工艺参数和工作状态进行周期的检测、记录、监视和提供报表，以供技术人员操作和分析用。也可以对各机架的负荷进行分配，预先设定辊缝、轧制力、速度、张力等参数，并从离线控制发展到在线控制，从开环控制发展到闭环控制，实现了计算机对生产过程的综合控制。随着微型机和可编程序控制器的出现，由集中的直接数字控制（DDC）向分散的局部专用计算机系统（如厚度自动控制、自动板形控制等）发展，从而简化了编程和维护，提高了灵活性和可靠性，局部的故障不致影响全局，降低了成本。冷连轧机计算机体系常用多级分布式，一般分为基础自动化级、过程自动化级和生产管理级三级。

基础自动化级采用可编程序控制器或直接数字控制专用控制机。其主要功能包括：进口钢卷运输、上料对中对高、喂料、穿带自动顺序控制；主令速度设定；轧机压下、轧制力、速度、张力的调节；厚度和板型的自动控制；辅助设备（如导卫装置、焊机、活套车、飞剪等）的自动控制；自动减速、甩尾或带尾位置控制；快速换辊；出口钢卷处理；称重；防跑偏；润滑和液压系统自动化。

过程自动化级采用微型机或小型机。主要功能包括：原始数据输入；轧制规范最佳选择及预设定；数学模型及模型自适应自学习控制；轧制程序计算、运行和动态控制；带材动态变规格控制；输出主令速度、厚度和板型调节、自动减速等的设定值和控制参数；材料跟踪；测量值收集与处理；操作与故障记录监视。

生产管理级采用超级小型机。其主要功能包括：接收上级系统的生产合同数据，检查和修改生产顺序；向现场管理终端或过程计算机输出指令；实时收集、存储、分析、处理轧制信息、设备运行状况、产品数据和检验报告；轧辊及仓库管理；生产调度；输出生产报表；输出产品出厂标牌；向上级系统返回实际生产管理信息。

冷连轧机的计算机系统可以仅作为全公司中央计算机系统的子系统运行。

简史　20 世纪 30 年代采用华德利翁（电动机-直流发电机）机组向冷连轧主传动直流电动机供电，1938 年首次在轧机上应用了汞弧整流器，到 50 年代得到较广泛的应用，60 年代以后又逐渐被晶闸管及半导体整流器所代替。随着微电子技术、计算机软件技术和现代控制理论的发展，1987 年全数字控制的变频调速技术首次进入了被直流电力拖动垄断了半个多世纪的冷连轧电控领域。现在大部分都采用这种全数字控制技术。

lengsuo dianlan jietou

冷缩电缆接头　（cold shrinkable cable joint）　用乙丙橡胶、硅橡胶或三元乙丙橡胶加工成管材，经扩张后，内壁用螺旋形尼龙条支撑的一种电缆附件。包括冷缩电缆终端和中间接头，一般用作 35kV 及以下挤包绝缘电缆线路的接头，特别适用于严禁明火的场所，如矿井、化工区及炼油厂等。

冷缩电缆接头在安装时只需将管子套上电缆绝缘线芯，拉去支撑尼龙条，管子靠橡胶的收缩特性，紧缩在电缆芯上。冷缩电缆接头的弹性记忆机理与热缩电缆接头的不同，它是依靠橡胶的物理性能，保持扩张后的机械内应力，直至移去螺旋形支撑条，靠橡胶内应力的平衡紧贴在电缆芯上，因此需要紧缩的部件可能用多根支撑条，如三叉手套共需大小 4 根螺旋形支撑条。

冷缩电缆接头一般做成多种零部件，在现场组装而成，它无需用传统电缆终端的瓷套管、电缆胶、底盘、外壳等笨重部件。因此，冷缩电缆终端紧凑轻巧，工艺简单省时，避免了加热用的明火。

冷缩电缆终端的主要部件有应力控制带、绝缘套管、三叉手套等，对于冷缩电缆中间接头，还有导体连接管。

应力控制带　用非线性电阻率的高分子材料制成带子，绕包在电缆绝缘层表面，代替传统电缆接头中的电缆应力

锥，也不需像热缩电缆接头的应力管那样要用明火加热收缩。它不但简化了现场安装工艺，并且缩小了电缆接头的外形尺寸，便于安装在紧凑的电气设备中。

绝缘套管　用橡胶聚合物压制成的模铸件，但内孔直径略小于需要套入电缆线芯绝缘的外径。制造厂将其内径扩张后放进尼龙支撑条，也可在安装现场就地进行内径扩张后套上电缆芯。

三叉手套　多芯电缆中防止雨水等从绝缘线芯空隙处渗进的手套状部件。（见热缩电缆接头）

导体连接管　两根电缆导线间的压接金具。（见热缩电缆接头）

lengyinji yingguangdeng

冷阴极荧光灯 (cold cathode fluorescent lamp)

一种利用低压汞蒸气辉光放电产生的紫外线激发管壁荧光粉发光的荧光灯。同霓虹灯一样，冷阴极荧光灯也分为负辉气体发光灯和正柱气体放电灯两种类型。如果充氖气，利用负辉区发光会发出橙色光，利用正柱区发光会发出红紫色光。利用负辉区发光的灯，如辉光指示灯，灯管做得较短。在利用正柱区发光的灯管中加入汞蒸气，就成为冷阴极汞气辉光灯，常用作紫外线光源，如果在灯管内壁涂上合适的荧光粉，就成为冷阴极荧光灯，其发光特性与荧光灯相似。

相对于采用热阴极弧光放电的荧光灯，冷阴极荧光灯由于采用辉光放电，因此电极的温度低，阴极溅散相对缓慢，灯丝寿命大大延长，一般可以达到 30 000h 以上，且多次开关对灯的寿命没有影响。由于灯丝不需要预热，因此可以在低温状态下点燃，一般可在－25℃环境下正常工作。灯点亮后，维持灯亮度的维持电压比较低，容易实现平滑调光。

因为处于辉光放电状态，阴极电子流密度不高，冷阴极荧光灯在灯管内产生的紫外射线远不如热阴极弧光放电状态的普通荧光灯，因此冷阴极荧光灯的发光效率比较低，一般只有 30～40lm/W，其应用大大受限，主要用于对照度要求不高的低温场所。

lizi daoti

离子导体 (ionic conductor)

由阴阳离子传导电流的物质，又叫第二类导体。它包括电解质的水溶液（常见的有酸、碱和盐的水溶液）、熔融态下的盐（如 NaCl）和固体电解质。离子导体在传导电流的同时，伴有化学物质的传递。其导电过程是：将离子导体中的两个电极接通电源时，阴离子移向阳极并将多余的电子传递给阳极；阳离子移向阴极，从阴极上获得所缺少的电子，变成低价阳离子或中性原子，在阴极析出，从而完成整个导电过程。当温度升高时，离子导体的流动性增加，减少了离子的运动阻力，因而离子的迁移速度提高，导电能力增加。由于离子导体在其离子迁移过程中，会遇到种种的阻力，所以它的导电能力比电子导体要小得多。

lidianchi

锂电池 (lithium battery)

以金属锂为负极活性物质的高能电池。锂是最轻的金属元素，电极电位很负，以其作为活性物质组成的电池，比能量远高于其他电池体系。（见锂离子蓄电池）

实现商品化的锂电池主要有 $Li\text{-}I_2$、$Li\text{-}Ag_2CrO_4$、$Li\text{-}MnO_2$、$Li\text{-}SO_2$、Li-（CF_x）$_n$ 及 $Li\text{-}SOCl_2$ 等体系，用于心脏起搏器、电子产品、无线电通信设备、导弹点火系统、火炮发射设备、潜艇、鱼雷、飞机及一些特殊的军事用途。锂和水接触会发生激烈的反应，因此，电解液必须用非水电解质溶液或有机电解质溶液和一定量的锂盐配成，电池形状有圆柱形、扣式及矩形等。

锂电池具有比能量大、电压高、放电电压平稳、工作温度宽（－40～50℃）、低温性能好及贮存寿命长等优点，受到广泛的关注。锂电池既可做成原电池，也有希望做成蓄电池或贮备电池，各种体系的锂电池类型及其性能见表。

各种体系的锂电池类型及性能

电池分类	电池体系	正极	电解质	负极	开路电压（V）	工作电压（V）	比能量（W·h/kg）	
							理论	实际
有机电解质	锂-聚氟化碳	$(CF_x)_n$	$LiClO_4$-PC	Li	3.14	2.6	3280	320
	锂-聚氟化四碳	$(C_4F)_n$	$LiAsF_6$-PC-THF	Li	3.14	2.9	2019	154
	锂-氯化银	AgCl	$LiAlCl_4$-PC	Li	2.84	2.5	600	66
	锂-二氧化锰	MnO_2	$LiClO_4$-PC+DME	Li	3.5	2.8	768	300
	锂-五氧化二钒	V_2O_5	$LiAsF_6$+$LiBF_4$-MF	Li	3.5	3.2	477	57
	锂-三氧化钼	MoO_3	LiA_5F_6-MF	Li	3.3	2.6	656	200
	锂-氧化铜	CuO	$LiClO_4$-THF+DME	Li	2.4	1.5	913	300
	锂-二氧化硫	SO_2	LiBr-SO_2+AN+PC	Li	2.95	2.7	1114	280
	锂-硫化铜	CuS	$LiClO_4$-THF+DME	Li	3.5	1.8	1100	250
	锂-二硫化铁	FeS_2	$LiClO_4$-PC+THF	Li	1.8	1.5	720	150
	锂-铬酸银	Ag_2CrO_4	$LiClO_4$-PC	Li	3.35	3.0	520	178
	锂-铋酸铅	$Pb_2Bi_2O_5$	$LiClO_4$-DIO	Li	1.8	1.5	195	90
无机电解质	锂-亚硫酰氯	$SOCl_2$	$LiAlCl_4$-$SOCl_2$	Li	3.65	3.3	1460	700
熔融盐电解质	锂-二硫化铁	FeS_2	LiCl-KCl（450℃）	LiAl	2.53	1.7	650	100
固体电解质	锂-碘电池	$P_2V_p \cdot nI_2$	LiI	Li	2.8	2.78	1900W·h/L	650W·h/L

lilizi xudianchi

锂离子蓄电池 (lithium-ion battery) 分别用两个能可逆地嵌入和脱嵌锂离子(Li^+)的化合物作为正、负极，以溶解于有机物或吸附在聚合物的锂盐作为电解质的蓄电池。习惯上，锂离子进入材料的过程叫嵌入，离开的过程叫脱嵌。这种靠锂离子在正负极之间的转移来完成充放电工作的电池被形象地称为“摇椅电池”。(见锂电池)

锂离子蓄电池的优点是放电电压稳定，工作温度范围宽，能量密度大，寿命长，自放电率低，无记忆效应，且不含有毒的重金属，对环境无污染。其不足是成本较高，运行温度较高，易短路，大容量集成的技术难度大。2002 年问世的磷酸铁锂电池($LiFePO_4$)具有更多优点：①输出效率高；②高温时性能良好；③即使电池内部或外部受到伤害，电池不燃烧，不爆炸，安全性最好；④极好的循环寿命，经 500 次循环，其放电容量仍大于 95%；⑤过放电到零伏也无损坏；⑥可快速充电；⑦低成本，对环境无污染。1997 年建成的中国首条锂离子蓄电池生产线见图 1。



图 1　中国首条锂离子蓄电池生产线

原理　锂离子蓄电池电化学式为

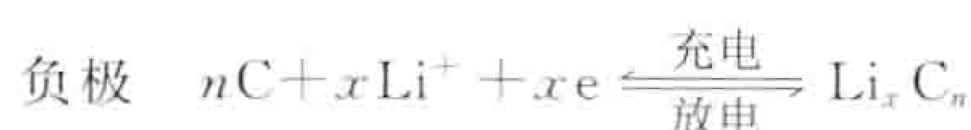


$$\ominus C_n \mid LiClO_4 - EC + DEC \mid LiMO_2 \oplus$$

其充、放电时的电极反应为



$$\text{正极}\quad LiMO_2 \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} Li_{1-x}MO_2 + xLi^+ + xe$$



$$\text{负极}\quad nC + xLi^+ + xe \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} Li_xC_n$$



$$\text{总反应}\quad LiMO_2 + nC \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} Li_{1-x}MO_2 + Li_xC_n$$

式中 $LiClO_4-EC+DEC$ 为以乙烯碳酸酯(EC)二乙基碳酸酯(DEC)混合液为溶剂、高氯酸锂($LiClO_4$)为溶质的电解液；M 代表 Co，Ni，Fe，W 等。

结构　主要由正、负极，隔膜，电解质及电池外壳组成，见图 2。根据所用电解质材料的不同，可以分为液态锂离子蓄电池(lithium-ion battery，LIB)和聚合物锂离子蓄电池(polymer lithium-ion battery，LIP)两大类。两者所用的正负极材料相同，电池的工作原理也基本一致，主要区别在于前者使用的电解质是液体，后者的电解质是聚合物。相比液态锂离子蓄电池，聚合物锂离子蓄电池没有漏液问题，因此结构大为简化，可以制成任意形状和尺寸，不需金属外壳和防爆阀，轻、薄且装配容易。

液态电解质常采用高氯酸锂($LiClO_4$)、六氟磷酸锂($LiPF_6$)、四氟硼酸锂($LiBF_4$)等锂盐作为溶质，由于电池的工作电压达 3.2～3.8V，高于水的理论分解电压 1.23V，且金属锂与水容易发生剧烈反应，因此常采用乙烯碳酸酯(EC)、丙烯碳酸酯(PC)、丁烯碳酸酯(BC)、二甲基碳酸(DMC)、二乙基碳酸(DEC)及甲基乙烯碳酸(MEC)等有机物代替水作为溶剂。聚合物电解质是将液态电解质吸附在一种聚合物基质上，有“干态”和“胶态”两种，大部分采用聚合物胶体电解质。

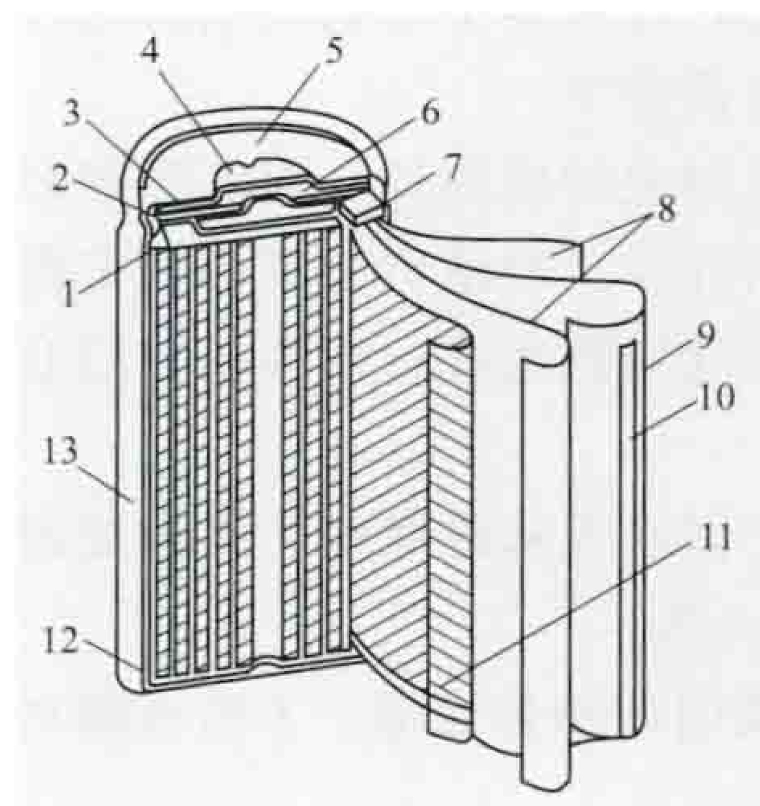


图 2　圆筒形液态锂离子蓄电池结构

1—绝缘体；2—垫圈；3—PTC 元件；4—正极端子；5—排气孔；6—防爆阀；7—正极；8—隔膜；9—负极；10—负极引线；11—正极引线；12—外壳；13—绝缘体

正极材料主要有钴酸锂($LiCoO_2$)、镍酸锂($LiNiO_2$)、锰酸锂($LiMn_2O_4$)、多元复合材料($LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O_2$)及磷酸亚铁锂($LiFePO_4$)，其中磷酸亚铁锂具有成本低、循环寿命长、高温安全性能好及环保等突出优点，逐渐成为首选的正极材料。

负极使用各种碳材料，如石墨、石油焦、碳纤维、热解碳、中间相沥青基碳微球、炭黑、玻璃碳等，其中石墨和石油焦最有应用价值。

集流体采用铝和铜。隔膜采用聚烯微多孔膜，如 PE、PP 或它们的复合膜，尤其是 PP/PE/PP 三层隔膜不仅熔点较低，而且具有较高的抗穿刺强度，起到了热保险作用。

电池特性　主要包括充、放电特性，电动势、容量、寿命等。

充、放电特性　锂离子蓄电池是一个锂离子浓差电池，充电时，Li^+ 从正极中脱嵌，进入液态、聚合物胶体，在外电场作用下向负极移动，依次嵌入负极，形成 Li_xC_n 化合物。如果充电速度过快(即充电电流过大)，会使得 Li^+ 来不及进入负极栅格，在负极附近的电解质中就会聚集 Li^+，这些 Li^+ 很可能从负极俘获一个电子成为金属 Li。持续的金属锂生成会在负极附近堆积、长大成树枝状的晶体，俗称枝晶；在充电速度适中情况下，随着负极的充满程度越高，Li_xC_n 晶格留下的空格越少，从正极移动过来的 Li^+ 找到空格的机会就困难，一样可能在负极附近形成枝晶，所以在充电的后半段必须逐步缩小充电电流。这两种现象称为过充电。

放电时，Li^+ 从负极中脱嵌，经电解质嵌入正极，过放电也会造成枝晶生长，机理与过充电过程类似。

枝晶的长大会刺破隔膜，造成短路，进而发热起火甚至爆炸。因此，锂离子蓄电池的充电电压不能超过 4.2V，充电终止及过流时要切断电路。

锂离子蓄电池的充、放电特性见图 3。

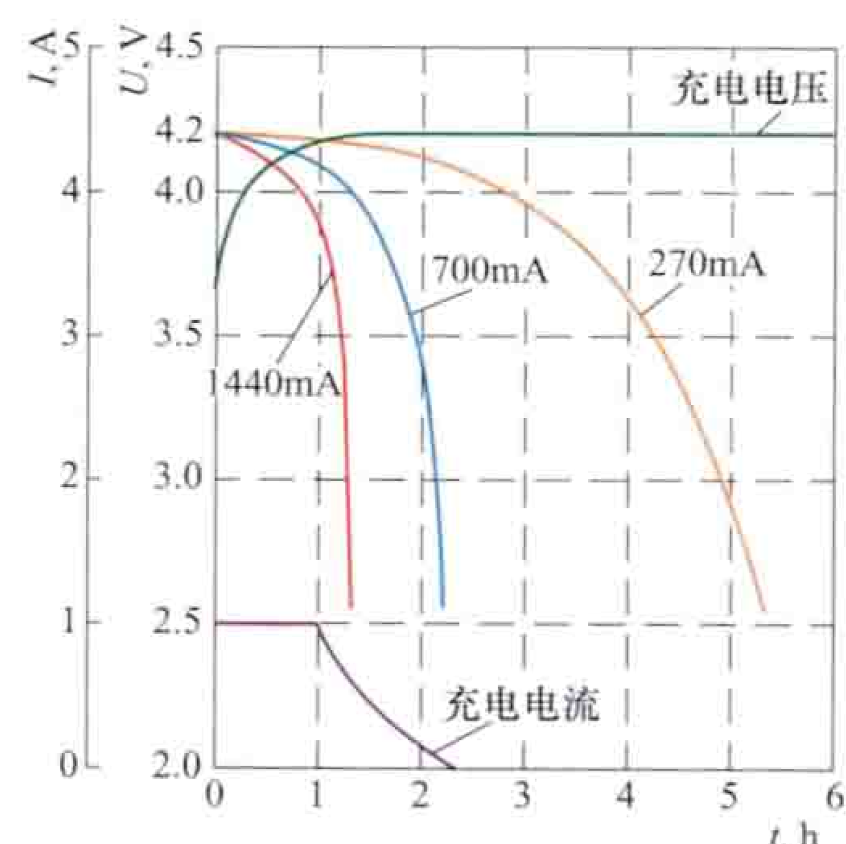


图 3　锂离子蓄电池的充、放电特性曲线(US18650 型)

电动势、容量、寿命　因电极材料不同而不同，见表。

锂离子蓄电池正极材料性能比较

材料	钴酸锂	镍酸锂	锰酸锂	磷酸亚铁锂
比容量（mA·h/g）	135～140	155～165	100～115	130～140
电压（V）	3.6	3.5	3.7	3.2
循环性能（次数）	≥300	≥800	≥500	≥2000

与其他类型蓄电池不同，锂离子蓄电池的充电过程会造成电解质的沉淀，内阻会因此变大，从而降低输出电流的能力，使容量降低；过充电带来的蓄电池温升以及过高的环境温度也会对蓄电池的容量带来损失。

用途　锂离子蓄电池广泛应用于移动电话（见图4）、笔记本电脑（见图5）、摄像机、医疗器械等，大容量高功率锂离子蓄电池已在电动汽车中使用。



图4　手机用锂离子蓄电池



图5　笔记本电脑用锂离子蓄电池

liju diandongji

力矩电动机　（torque motor）　可直接驱动负载，在低速、堵转状态下连续工作，以输出转矩为主要特征的伺服电动机。力矩电动机主要有交、直流两大类，还有有限转角力矩电动机。

直流力矩电动机　采用直流电动机结构的力矩电动机。其工作原理与直流伺服电动机相同。为了在低转速时能产生大的输出转矩，一般电枢绕组做成扁平结构的盘式，电枢长度与其直径之比为0.2左右，定子做成多极永磁式。为了减小转矩和转速的脉动，电枢选用较多的槽数、串联导体数和换向片数。为了使电动机工作稳定，电动机的输出转矩不得超过堵转峰值转矩。与堵转峰值转矩相应的电枢电流称为峰值（堵转）电流。如果电枢电流超过峰值（堵转）电流，磁钢会去磁，电动机需要重新充磁才能正常工作。直流力矩电动机反应速度快，转矩和转速波动小，能在很低转速下稳定工作，机械特性和调节特性线性度好，具有高耦合刚度，特别适合在位置控制系统和宽调速控制系统中作为执行元件。

直流力矩电动机的总体结构形式有分装式和组装式两种。分装式结构包括定子、电枢和刷架三大部件，机壳和转轴由用户根据安装方式自行选配；组装式则与一般电动机相同，机壳和转轴由制造厂装配成整机。图1所示是直流力矩电动机的结构示意图。

交流力矩电动机　采用异步电动机结构的力矩电动机。其工作原理与感应电动机相同。为了获得低转速、大转矩，电枢绕组做成扁平结构的盘式，极数较多。为了具有宽广的调速范围和较软的机械特性，可通过增加转子电阻来实现，笼型转子的导条通常用电阻率较高的黄铜制成，或者用钢制成实心转子。由于交流力矩电动机的阻抗较大，堵转电流较小，又采用强迫通风，可短期或长期运行在堵转状态。交流力矩电动机的调速用改变端电压的方法，通过速度负反馈的自动控制系统来实现。

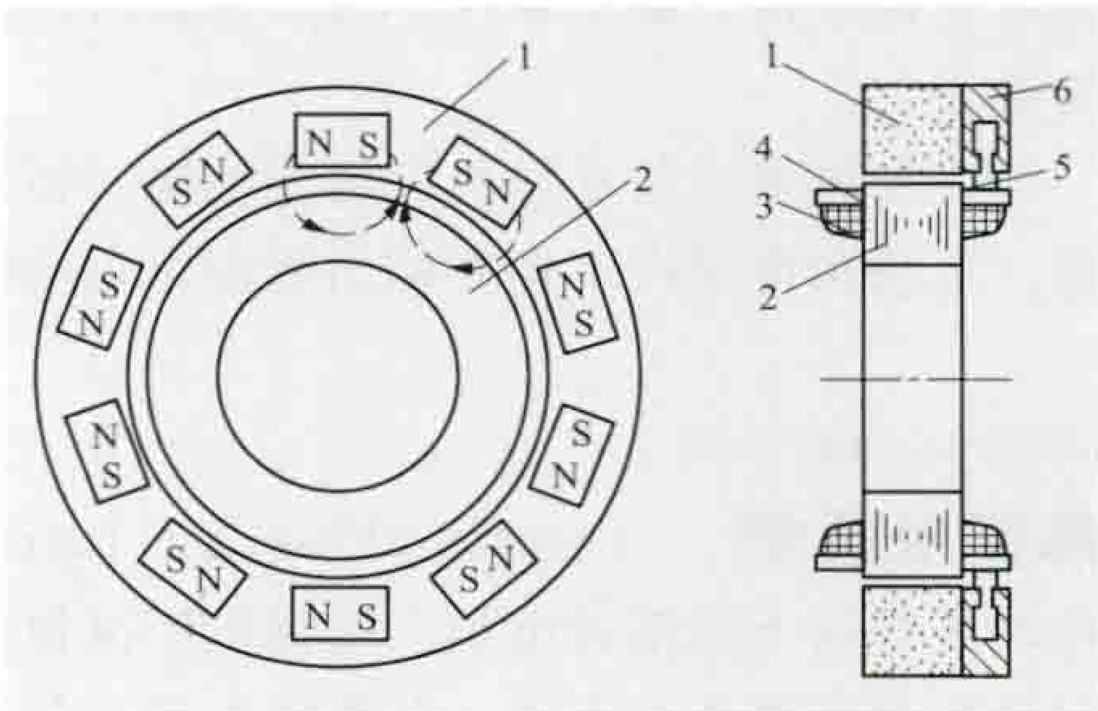


图1　直流力矩电动机结构示意图

1—定子；2—电枢铁芯；3—电枢绕组；4—槽楔兼作换向片；5—电刷；6—刷架

交流力矩电动机广泛应用于造纸、电线电缆、纺织、电影胶片冲洗等卷绕、导辊装置中。按其用途和相应的机械特性，交流力矩电动机可分为具有近似卷绕特性（恒功率）和具有近似导辊特性（恒转矩）两类。它们的机械特性分别如图2（a）和图2（b）中的曲线1所示。当需要将产品卷绕在辊筒上时，若为恒张力、恒线速传动，即 $Fv=P$（功率）为常数时，其卷绕特性呈双曲线形状，如图2（a）中的曲线2所示。在卷径比（设开始时卷筒直径为 D_1，以后变为 D_2，则卷径比等于$\frac{D_2}{D_1}$）为1～2的范围内，电动机的机械特性和卷绕特性曲线接近，如图2（a）所示。当需要电动机传送产品时，称为导辊传动。这时要求张力 F 为恒定，由于导辊直径 D 始终不变，所以 $FD=T$（转矩）为常数，即导辊特性为一水平线，如图2（b）中的曲线2所示。具有近似导辊特性的交流力矩电动机，其机械特性恰在一较宽的转速范围内接近负载特性，如图2（b）所示，与卷绕特性力矩电动机相比，其转子阻抗较低。

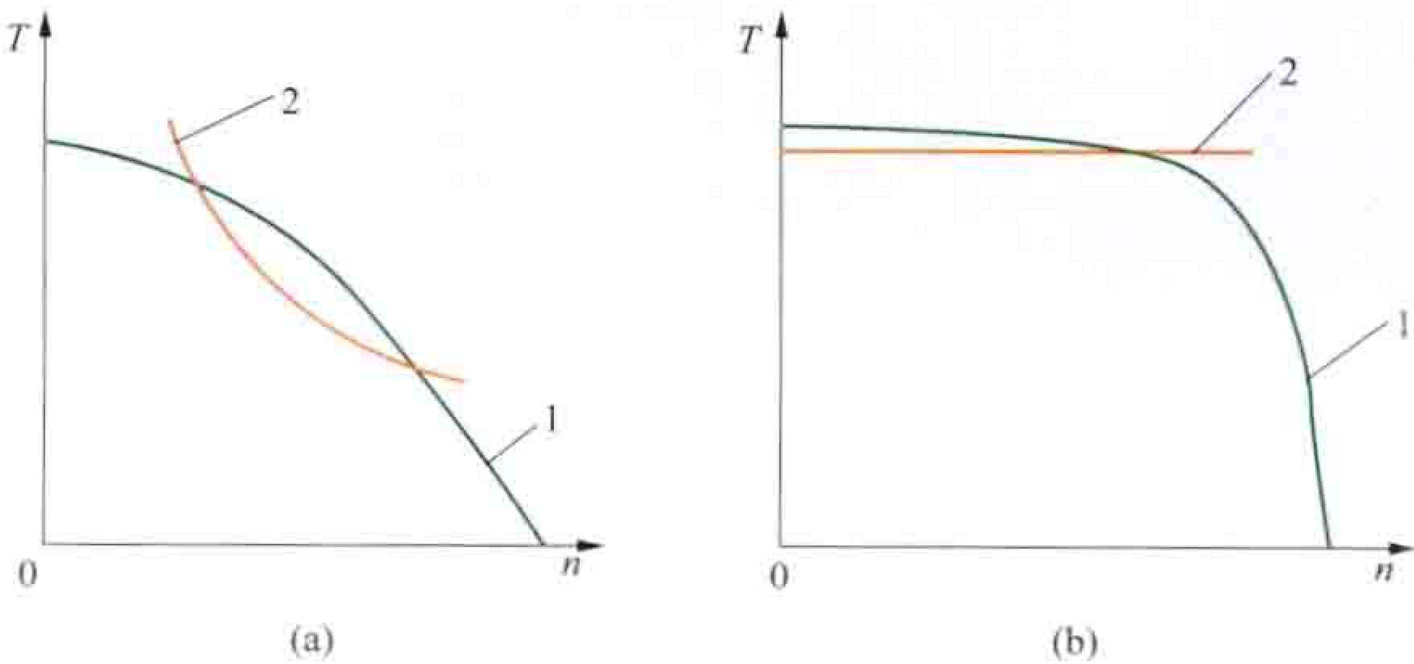


图2　交流力矩电动机的机械特性和负载特性

（a）卷绕特性交流力矩电动机；（b）导辊特性交流力矩电动机

1—机械特性；2—负载特性

为了克服直流力矩电动机采用电刷和换向器带来的弊端，20世纪90年代以来发展了无刷直流力矩电动机，其原理与无刷直流电动机（见永磁同步电动机）相同。力矩电动机既具有永磁直流电动机同样的机械特性、良好的调速性能，以及因采用永磁体励磁而无励磁损耗的优点；又具有无刷直流电动机没有换向火花、没有无线电干扰，寿命长，运行可靠，维修简便，噪声低的优点；还具有一般力矩电动机不通过减速器直接驱动负载，并可工作于低速和堵转状态的

特点。因此，力矩电动机广泛应用于空间宇航技术、位置和速度控制系统、磁记录仪、电影摄影机以及一些特殊环境的装置中。

有限转角力矩电动机　给绕组输入恒定电流时，电动机在一定转角范围内工作并输出近似恒定转矩。

liangang dianhulu

炼钢电弧炉　(steelmaking arc furnace)　利用电弧加热并用于炼钢的电炉。炼钢生产流程主要有两种，即通常说的短流程和长流程，其炼钢生产工艺分别为“炼钢电弧炉—钢包精炼炉—连铸机—连轧机”和“高炉—氧气转炉—钢包精炼炉—连铸机—连轧机”。在短流程炼钢生产工艺中，炼钢电弧炉以废钢或海绵铁为主要原料，再加入少量辅料和合金在炉内冶炼成钢液。在长流程炼钢生产工艺中，以铁矿石和焦炭等为主要原料，在高炉中冶炼成铁水，再在氧气转炉（或转炉）中冶炼成钢液。短流程投资比产量相当的长流程投资少，速度快，生产过程碳排放量小，而其炼钢的主要原料是工业生产中的废弃设备或材料，是将废弃的钢铁及其合金回收再利用，符合节能环保的要求。

炼钢电弧炉（见图 1）有三相交流炼钢电弧炉、直流炼钢电弧炉、真空电弧炉 3 类。三相交流炼钢电弧炉应用广泛；直流炼钢电弧炉在 20 世纪 90 年代得到应用，但未得到推广；真空电弧炉用于冶炼特殊钢和合金，应用范围较小。

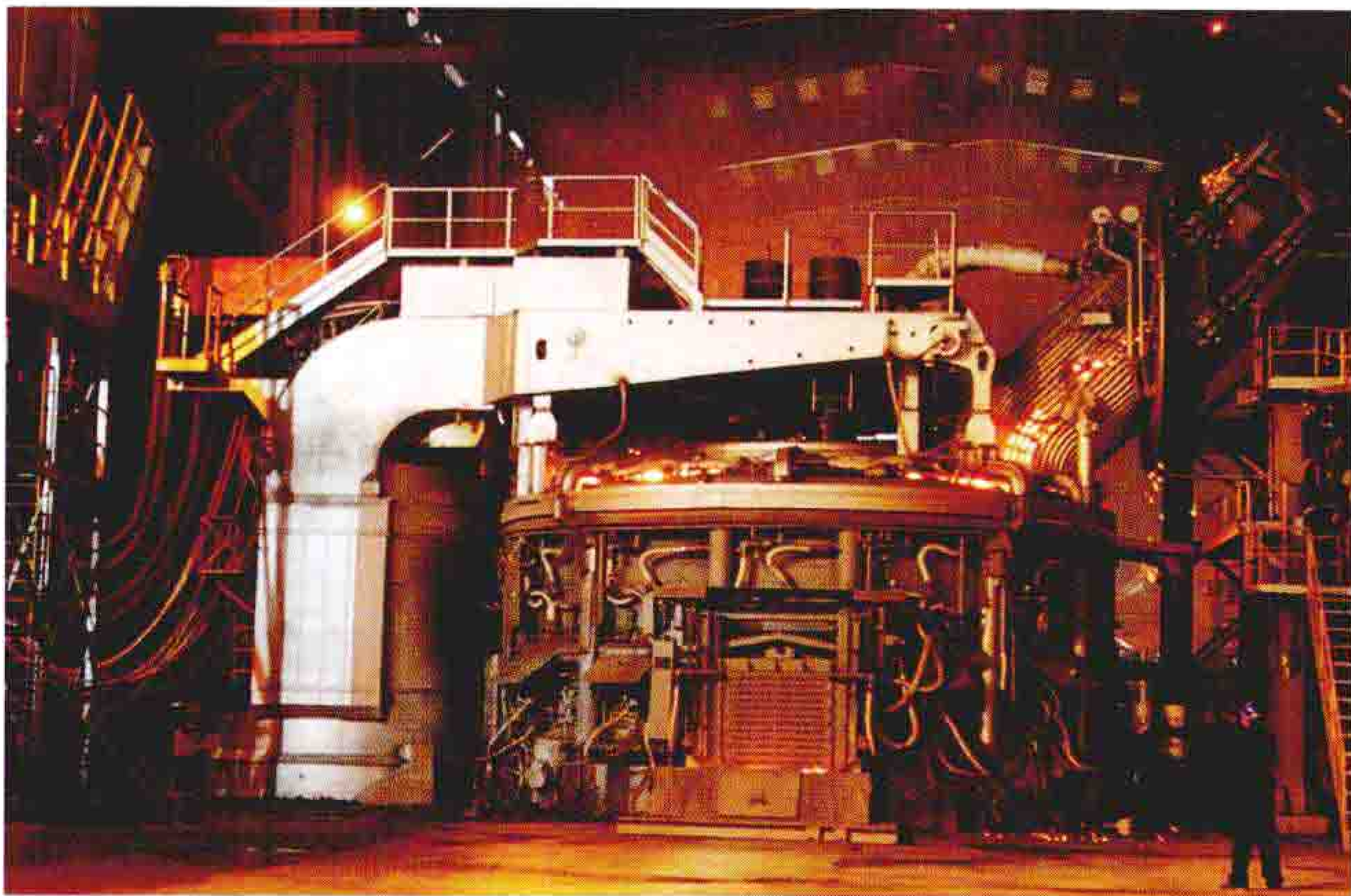


图 1　炼钢电弧炉

三相交流炼钢电弧炉　采用三相交流电供电的电弧炉。

设备组成　三相交流炼钢电弧炉由炉体机械设备、主电路设备、电气控制设备等组成。根据用户要求，也配套提供废钢预热和连续进料的设备。

（1）炉体机械设备。如图 2 所示，主要由炉壳、炉座及其倾动机构、炉盖及其提升和旋转机构、石墨电极、导电横臂、电极立柱及其升降机构等组成。炉壳内砌有用耐火材料筑成的炉衬，炼钢时钢液在其中形成熔池。随着电弧炉功率的增大，以循环水冷却的管式水冷炉壳和管式水冷炉盖得到推广应用。电极由电极横臂夹头夹持并固定在立柱上，由电极调节器控制升降。炉盖提升和旋转机构可以将炉盖提升和下降，并可将其从炉体上旋开，以便用料筐向炉内装废钢。炉子的倾动机构可将炉子向出钢方向或出渣方向倾斜一定的角度，以便炉子出钢或出渣。与钢包精炼炉配套使用的炼钢

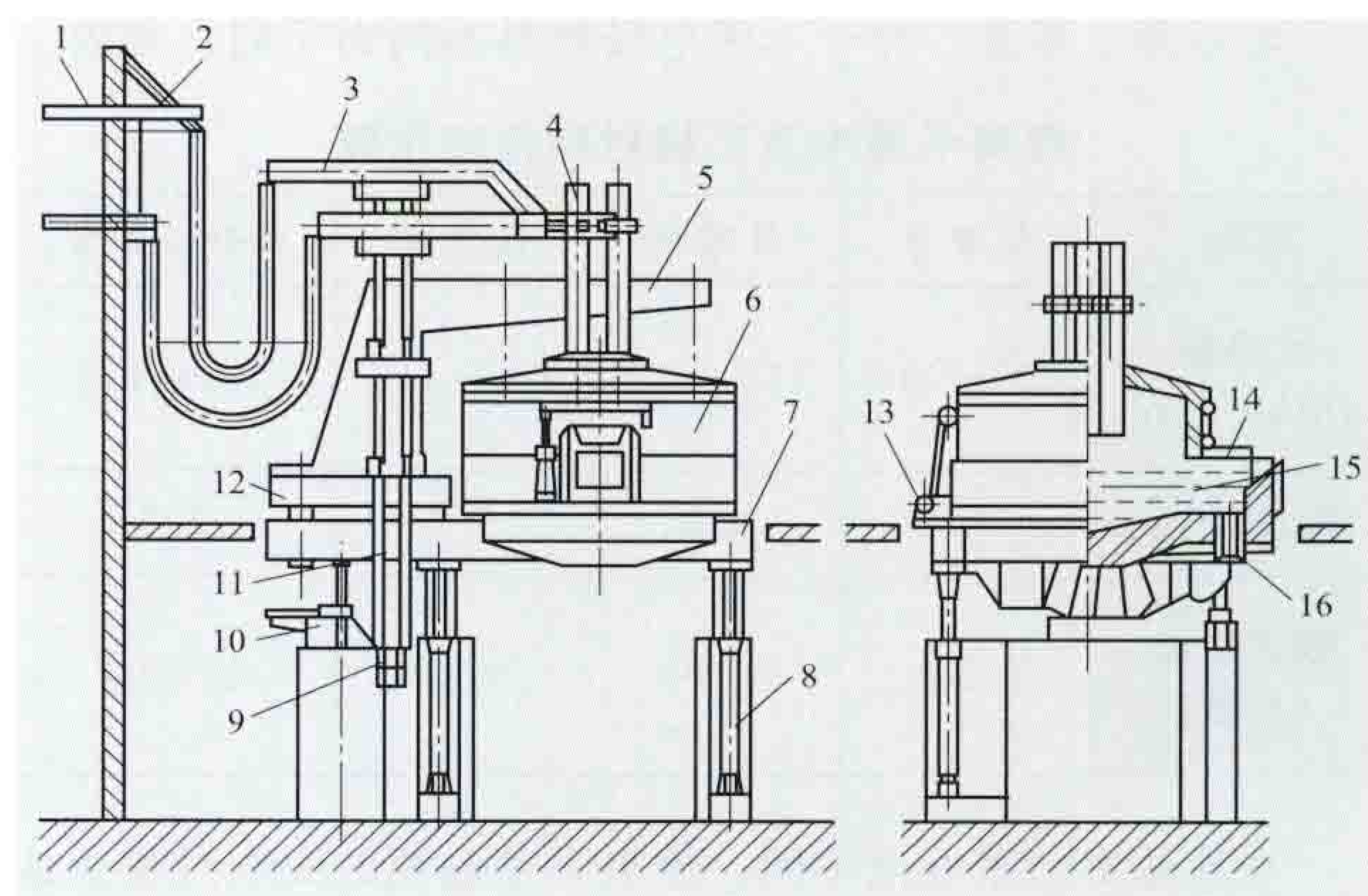


图 2　三相交流电弧炉结构示意图

1—变压器引出母线；2—大电流线路；3—导电横臂；4—石墨电极；5—水冷炉盖提升桥架；6—炉壳；7—倾动平台；8—倾动装置；9—电极升降液压缸；10—倾动固定用支架；11—电极升降立柱；12—炉盖旋开平台；13—炉门；14—小盖；15—熔池；16—偏心底出钢口

电弧炉，设有偏心底出钢装置，实现无渣出钢。炉子的驱动方式可采用电动机或液压驱动，大容量炉子以液压驱动为多。炉体各受热构件，如炉门框、电极夹头等都用水冷却，是炉子的易损件。大容量电弧炉都有专用的液压装置，通常采用恒压变量泵以及电液比例阀等组成液压回路。电弧炉的水冷系统可采用闭路循环或开路循环，两种循环方式各有优劣，皆可满足电弧炉构件的冷却要求。三相交流炼钢电弧炉炉体机械设备中，还有碳、氧枪和炉壁氧燃烧嘴等设备，以便向炉内输入氧气和天然气等辅助能源，加速废钢的熔化。炉门碳、氧枪，有自耗式和水冷非自耗式两种，可通过炉门向熔池吹入氧气助熔，也可通过碳枪向熔池吹入碳粉来产生泡沫渣以屏蔽电弧，减小电弧向炉衬的辐射热损失，降低炉衬烧损的可能性。炉壁氧燃烧嘴通常布置在炉膛的冷区，可加速冷区废钢的熔化，缩短熔化时间，提高炉子的生产率。在炉壁有时也设置碳、氧枪。容量为 100t 以上的电弧炉，在炉壁上设置的氧燃烧嘴及碳、氧枪可达 5～6 根。

（2）主电路设备。炼钢电弧炉是消耗电能很大的用电设备，其负载激烈波动，呈不规则变化，为了减少线路上的电能损耗和避免对其他用电设备的影响，每台电弧炉均设置有专用的高压供电设备和电炉变压器，如图 3 所示。电弧炉的一次侧和二次侧电路，包括高压供电设备、电炉变压器、大电流线路（简称短网），称为电弧炉设备的主电路。主电路通过电弧连接到炉料，以炉料及钢液为三相电路的中性点。

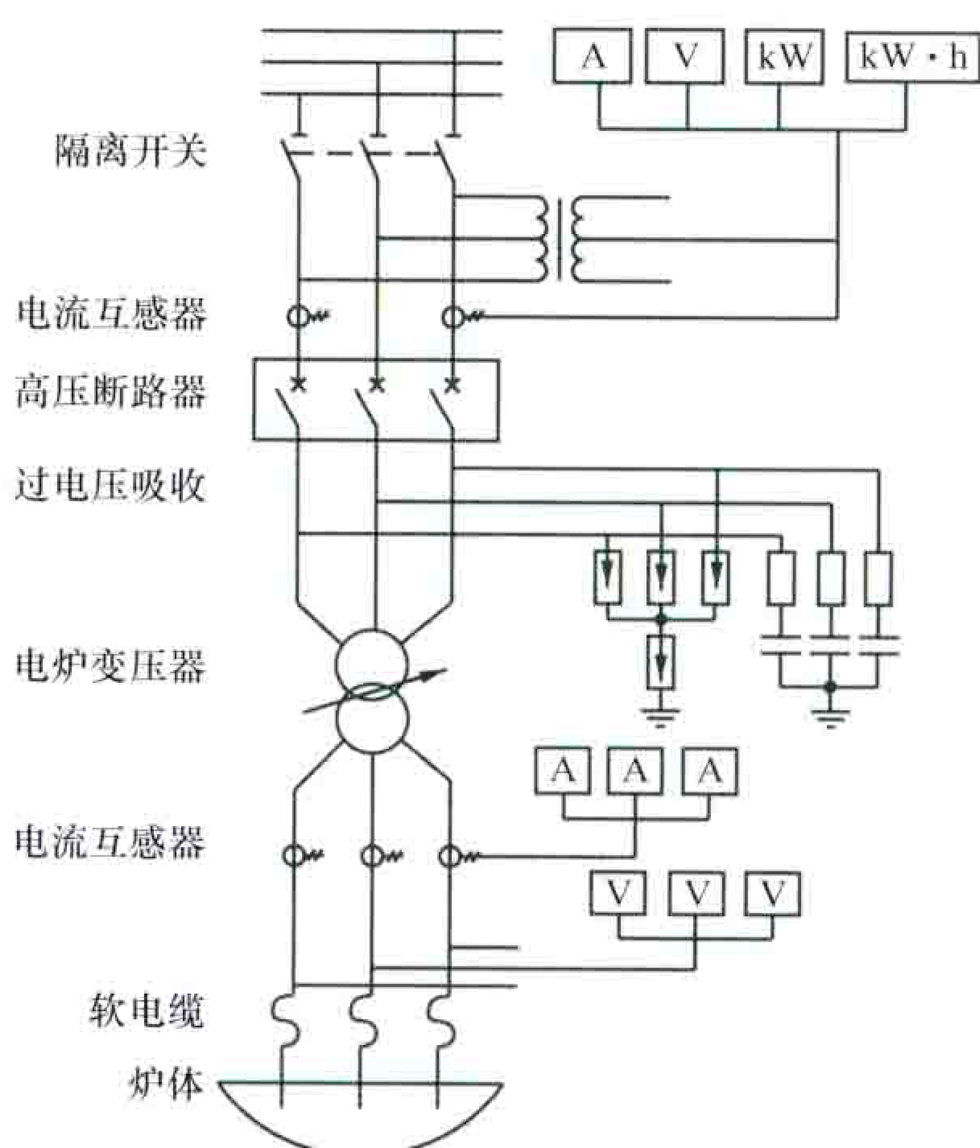


图 3　三相交流炼钢电弧炉主电路

炼钢电弧炉通常由 6～110kV 中、

高压配电网供电，其中以35kV供电最多，通过电弧炉高压电气设备供至电炉变压器的高压侧。在高压侧，中、高压断路器用来接通或断开主电路，必须确保其安全、可靠，可频繁动作，并且操作方便。对于35kV级电压，大多采用高压真空断路器，并用氧化锌避雷器及阻容吸收环节作为抑制操作过电压的吸收装置。

20世纪90年代以后，高阻抗电弧炉得到推广并取得很好的效果。它是在电弧炉的高压主电路供电系统内串联电抗器，依靠电抗器的电感来限制电弧电流的变化率，使燃弧电压提高，并使电弧能稳定燃烧，从而提高电弧功率及炉子的综合输入功率。由于有较高的电感值，炉子的二次电压可以提高，并可相应减少电弧电流，炉子可在较长的电弧下运行，使短路电流减小，电极、电极横臂等运动部件的感应电动力减小，电极折断的几率减小。由于采用长电弧操作，使二次电流变化率减小，一次电压的变化率也相应减小，使得电压闪变及谐波干扰对电网的公害也相对降低，高阻抗运行还能降低电弧的噪声。

电抗器通常布置在紧靠电炉变压器的一次侧，也可以和电炉变压器做成一体，直接放在电炉变压器内。布置在电炉变压器外的电抗器为铁芯式，其电抗值分为6～8挡，采用无励磁电动开关调节挡位，依据冶炼情况选择不同的电抗值。一般情况下，二次电压越高，需匹配的电抗器额定容量也越大。通常，电抗器额定容量大约为变压器额定容量的15%～20%。

(3) 电气控制设备。主要有电极自动调节器，传动控制系统，冷却水温度、压力、流量检测系统等。大型电弧炉配备有两级计算机控制系统，由PLC及工作站组成基础级控制，工业计算机组成过程级控制。计算机控制设备除了用于单台电弧炉外，还可对整个炼钢车间的多台电弧炉作业进行综合控制。其功能包括：装入料的配料计算和装料控制；各熔炼阶段的输入功率控制；根据取样分析结果，计算和控制渣料和合金的加入量等。

(4) 废钢预热和连续进料设备。在炉子各项热损失中，炉气带走的热量最大，占总热损失的20%～25%，废气带走的热量可达150kW·h/t左右。因此，炉气余热利用受到广泛关注，先后出现了吊篮废钢预热法、双炉壳废钢预热法、竖炉废钢预热法、连续式废钢预热法等。

21世纪初，中国开发了一套新型推杆式废钢连续预热设备。它是在炉子侧面设置一套废钢预热器，经预热的废钢不断进入下部废钢输送料槽，然后用液压缸推杆将废钢连续地推入炉内。用此方法的炉子不用旋开炉盖加料，可以减少停电加料时间，经济效益显著。

在用炉气预热废钢时，应重视避免白烟、二噁英等有害气体的产生。

电特性　在工作电压下，电弧炉的功率、功率因数、电效率等与电弧电流之间的关系。三相交流炼钢电弧炉在简化电路的条件下（即假设变压器一次电压、线路电阻和电抗值不随电流而变，电压和电流为正弦波，变压器空载电流为零，三相完全平衡），其等效电路为一个由线路相电阻 R、线路相关电抗 X、电弧电阻 R_h 三者串联的单相电路。供电电压为变压器二次相电压 U（各电参数都折算到变压器的二次侧）。在这个电路中，R、X 和 U 都可看作是常量，而 R_h 是电弧电流 I 的函数，即 $R_h=\sqrt{U^2-(IX)^2}/I-R$，因此，可以从这个等效电路推导出功率（包括视在功率、无功功率、有功功率、线路损失功率、电弧功率）、功率因数、电弧电压、电效率等与电流的函数关系，并就某一组 U、R、X 的值计算和绘制一组曲线。这就是三相交流炼钢电弧炉的电特性曲线，见图4。从图上可以看出，输入的有功功率和电弧功率分别有其最大值。有功功率的最大值出现在当线路功率因数等于 $1/\sqrt{2}$ 时，电弧功率的最大值出现在 $R_h=\sqrt{R^2+X^2}$ 时，此时功率因数大于 $1/\sqrt{2}$。

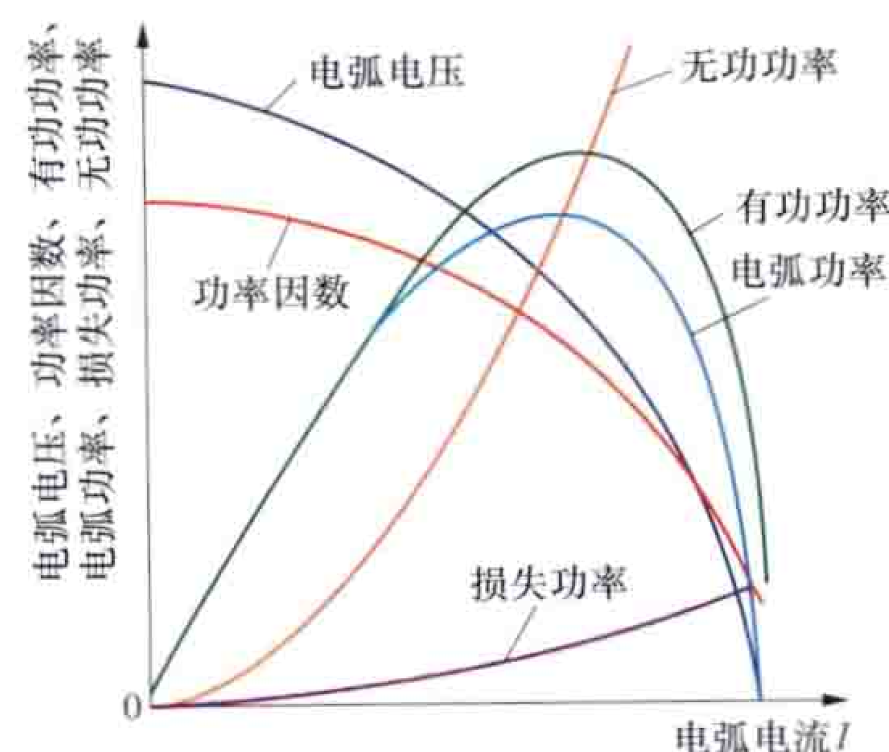


图4　三相交流炼钢电弧炉电特性曲线

电特性可用来选择电弧炉的工作电流区。通常按功率因数值选择，其范围一般为0.65～0.85。实际运行中，由于线路中电流有谐波分量，线路电抗会增大10%～15%，电特性应作相应修正。

运行状态　空载、短路、有功功率最大和电弧功率最大是三相交流炼钢电弧炉运行中4个特殊工作点。①空载：炼钢电弧炉处于断路，无电弧，无电极工作电流。②短路：电极和炉料接触而短路，电弧电阻、电弧功率均为零，电极工作电流为短路电流。③有功功率最大：此时变压器一次侧有功功率和无功功率相等，功率因数为0.707。④电弧功率最大：这是电弧炉运行要寻求的目标，电弧炉通常在其最大电弧功率的70%～110%范围内运行，功率因数为 $0.707<\cos\varphi<0.866$。

操作　没有配备炉外精炼炉的炼钢电弧炉熔炼时，其操作程序为装料、熔化、精炼、出钢，冶炼周期为2～4h，电耗约500～700kW·h/t［见单位产品（产值）耗电］。冶炼周期中，熔化期内要输入变压器最大容许功率，有时还进行吹氧或用燃料加热以加速炉料熔化。熔化时间取决于输入功率、装料状况、电极调节器的性能以及电网电压波动程度等因素。精炼时间取决于钢液的化学成分和温度等。在精炼期输入功率比熔化期小，供电系统轻载运行。为了充分利用供电设备的装备容量，在现代化炼钢企业中将电弧炉与炉外精炼设备配合使用（见钢包精炼炉），这时，熔化时间只需要1h左右，熔化电耗可降低到350～500kW·h/t，总的炼钢成本明显降低。

对环境的污染和危害及其防治　炼钢电弧炉对环境的危害主要为烟尘、噪声和对电网的干扰。

烟尘由炉料本身的冶金反应，以及炉料、空气、氧（当吹氧助熔时）、燃料（当用燃料助燃时）相互间的化学反应生成，标准状态下，电弧炉冶炼1t钢，产生的烟尘有400～800m³。熔化期量大，精炼期量小，通常用排烟设施加以排除。排出的烟尘用布袋、静电除尘装置除尘。烟气中的一氧化碳，可用于预热炉料或烘烤钢包，以回收部分热能。

在电弧炉作业区噪声可达120dB以上。避免噪声危害的措施有：把电弧炉操作室设置在可隔音、有移动门的密闭罩内；操作人员戴头盔，将电弧炉设置在远离居民集中

区等。

电弧炉冶炼时，无功功率剧烈变化，使配电网的电压产生闪变，影响接在同一配电网上的其他用电设备，对电网产生干扰。防治干扰的措施有：公用电网的短路容量应足够大，一般要求电网的短路容量要大于电弧炉变压器额定容量的 80～100 倍；在电弧炉变压器高压侧设置静止式动态无功补偿装置（SVC）等。

直流炼钢电弧炉 采用直流电作为供电电源的炼钢电弧炉。炉子的机械设备和三相交流炼钢电弧炉相似，但只有一根石墨电极、导电横臂和电极夹头作为直流电弧炉的阴极。在炉体的下部有一根底电极，作为直流电弧炉的阳极。底电极有 3 种结构形式：①用低碳钢制造的多柱式或片式空气冷却的底电极；②铜钢复合水冷底电极；③导电炉底式底电极。直流电源由整流变压器与大功率晶闸管整流装置组成。其电气控制的特点：①具有足够的电压裕度和电流裕度，能够耐受过电压和过电流的冲击；②系统具有电流下坠特性，当发生运行短路时整流装置输出电压自动降低以限制运行短路电流；③系统的直流输出电压可以方便地连续调整；④系统的动态响应时间短，以尽快地维持输出电流稳定；⑤损耗低，效率高。

直流炼钢电弧炉的优点：①对电网的干扰和冲击少；②石墨电极消耗低；③对钢液的搅拌力强，钢液成分及温度均匀；④噪声低，在输入功率相同时，直流电弧炉的噪声比交流电弧炉低 10～15dB。

直流电弧炉没有得到大量推广，原因有：①交流炼钢电弧炉，特别是高阻抗电弧炉及其相关技术得到快速发展，各项性能指标已达到直流电弧炉的水平；②大功率晶闸管整流装置投资费用高，维护、检修费用增加；③底电极要定期更换、检修，增加了直流电弧炉操作的工作量及生产成本，降低了炉子的生产率；④直流电弧炉运行时，由于各种原因，有时会产生偏弧现象，造成熔池耐火材料局部烧损，给补炉等工作增加了难度。图 5 所示为 40t 直流炼钢电弧炉。



图 5　40t 直流炼钢电弧炉

真空电弧炉 在真空中熔炼金属的直接电弧炉。（见真空电弧炉）

历史与发展 炼钢电弧炉的开发与应用至今已有 130 余年的历史，经历了直流-交流-交、直流共同发展的历程。1879 年，德国人 K. W. 西门子（Karl Wilhelm Siemens）制造了一台实验用直流炼钢电弧炉。1889～1890 年间，法国人 P. L. T. 埃鲁（Paul Louis Toussaint Heroult，1863—1914）制成了第一台可供实用的直流电弧炉。1911 年前后出现了三相交流炼钢电弧炉，之后得到迅速发展并占据了主导地位。第一次世界大战期间，德国已有 30t 的交流电弧炉。第二次世界大战后，随着世界钢产量的增加和炉外精炼技术、电渣重熔技术（见*电渣重熔炉*）等的发展，炼钢电弧炉所炼的钢种除了合金钢外还转向普通钢，电弧炉容量不断扩大。1954 年，美国 200t 三相交流炼钢电弧炉投入运行。1964 年，美国人 W. E. 施瓦伯（W. E. Schwabe）等提出高功率和超高功率概念，制成了 2 台 135t 超高功率电弧炉。1971 年美国 360t 超高功率电弧炉投入运行，这是至 20 世纪末世界上容量最大的炼钢电弧炉。此后容量为 100～150t 之间的炼钢电弧炉得到大量应用，与炉子相关的技术得到改进和提高，使其成为炼钢生产中两大炉种之一。

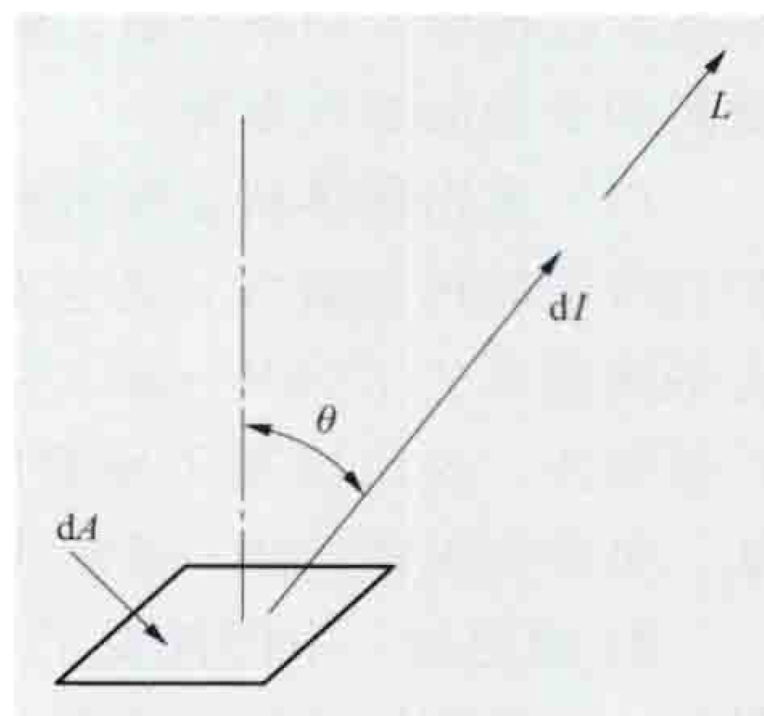
20 世纪 50 年代，中国开始制造三相交流炼钢电弧炉，主要是 5t 以下的小型炉。1966 年制成 30t 炉盖旋开式顶装料电弧炉，1976 年制成 75t 普通功率炼钢电弧炉，80 年代以后又制造了一批 30t 超高功率炼钢电弧炉和 50t 高功率的三相交流炼钢电弧炉，90 年代制造了 30～40t 直流电弧炉。之后又制造了容量为 100t 的高阻抗电弧炉，以及与外商合作制造的 250t 大容量高阻抗电弧炉。三相交流炼钢电弧炉的相关技术，如集束式氧枪、高效氧燃烧嘴、新型铜钢复合导电横臂、新型电极调节器、计算机综合控制系统等已接近或达到发达国家的水平。

liangdu

亮度　（luminance）　发光表面上某一点的微面积在给定方向上的发光强度 $\mathrm{d}I$ 除以该微面积 $\mathrm{d}A$ 在垂直于给定方向的平面上的正投影面积所得之商，又称光亮度，以符号 L 表示，见图。其表达式为

$$L=\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}A\cos\theta} \quad (1)$$

亮度的单位为坎德拉/米²（$\mathrm{cd/m^2}$）。



亮度概念

亮度与照度的关系　对于均匀漫反射或均匀漫透射材料，无论入射光方向如何，其表面各方向上的亮度都是均匀一致的。在这种情况下，表面亮度与照度有以下关系

$$L=\rho E/\pi \quad (2)$$

$$L=\tau E/\pi \quad (3)$$

式中 L 为表面亮度，$\mathrm{cd/m^2}$；ρ 为材料的表面反射比，即反射的与入射的光通量之比；τ 为材料的透射比，即透过的与入射的光通量之比；E 为表面照度，lx，对于透光材料是指入射光一侧表面上的照度。在照明工程中，常用式（2）和式（3）近似地计算房间无光泽漫反射或均匀漫透射表面的亮度。

亮度因数　在规定的照明观测条件下，给定方向上物体表面的亮度与同一照明条件下完全反射（$\rho\approx1$）或完全透射（$\tau\approx1$）的均匀漫射体亮度之比，符号为 β。由这个定

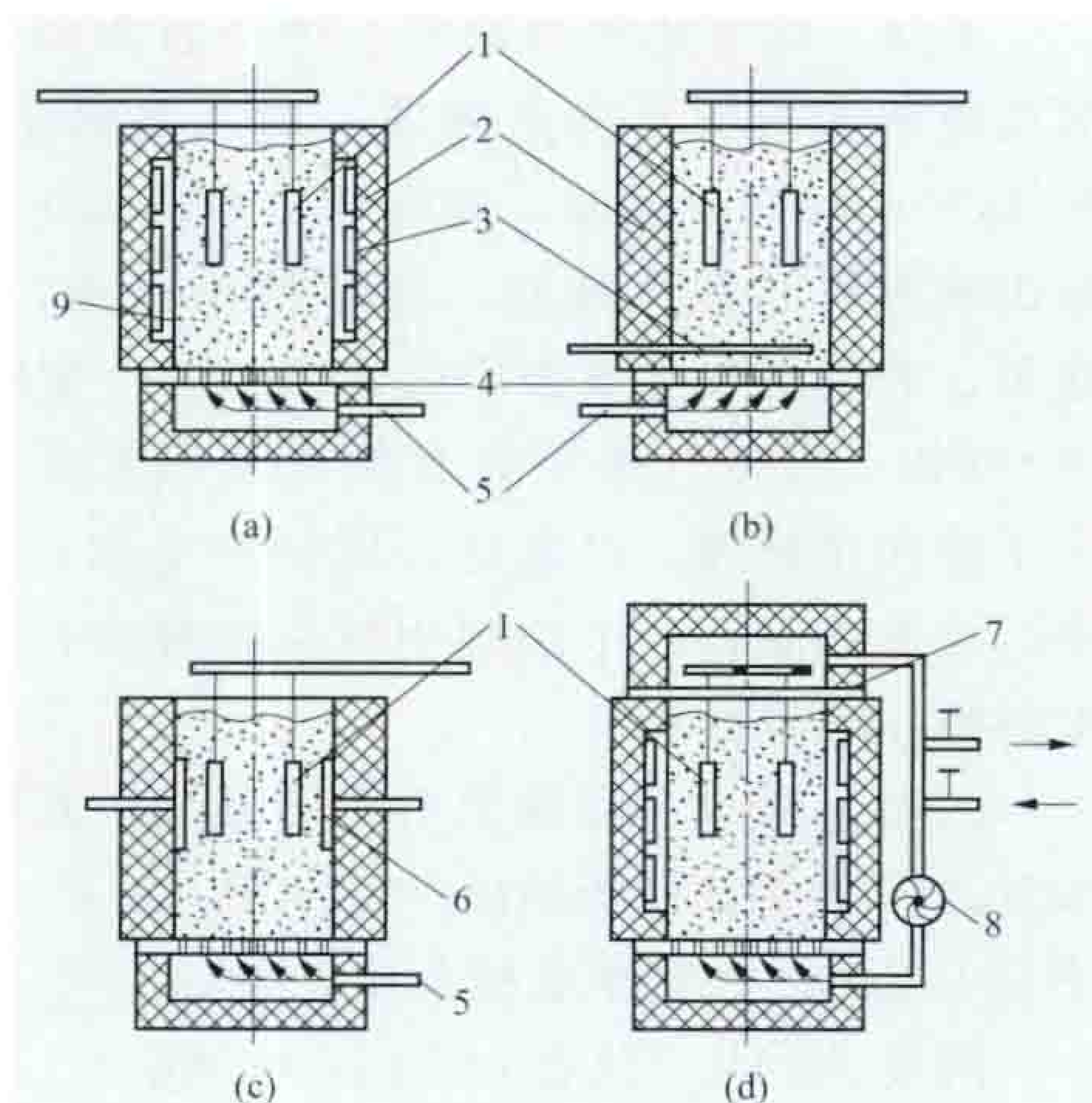
义可知，均匀漫射表面的亮度因数是一个常数，并且在各种照明条件下，在所有方向上都等于它的反射之比。具有一部分规则反射特性、一部分漫反射特性的混合反射表面的亮度因数只有在均匀亮度的环境中才是常数；在其他环境中，根据照明条件和反射特性，β 数值可从 0 到接近无穷大。

liutai lizilu

流态粒子炉

(fluidized bed furnace)　物料浸没在流态化粒子介质中进行加热或冷却的电阻炉。按工作温度，流态粒子炉可分为低温炉（750℃以下）、中温炉（750～1000℃）和高温炉（1000℃以上）3类。工业上中温炉用于工件的淬火和退火加热，也可以进行渗碳、渗氮化学处理；低温炉用于回火和缓冷等；高温炉虽已有多年研究历史，但至今未推广应用。

流态粒子炉的炉膛内装有作为传热介质的固态粒子。流态粒子由加热元件在炉膛外部［见图(a)］或内部［见图(b)］间接加热，也可由布置在炉膛内的电极通过导电粒子通电发热进行加热［见图(c)］，此外，还有气体循环式流态粒子炉［见图(d)］。



流态粒子炉示意图

(a) 加热元件外部间接加热；(b) 管状加热元件内部间接加热；(c) 电极通过导电粒子通电加热；(d) 气体循环式流态粒子炉

1—工件；2—炉衬；3—加热元件；4—布风板；5—进气管；6—电极；7—过滤板；8—涡轮风机；9—炉罐

与电热浴炉相比，流态粒子炉的优点是：①石墨粒子的比热容较熔盐的小，炉子起动方便，冷炉升温速度快；②由于固态粒子不断翻动，炉温均匀；③物料热处理后表面清理方便；④使用安全，不会发生爆炸事故。缺点是：①物料加热速度慢；②对流态化控制较困难，控制不当会产生气泡、飞溅、失流等现象，影响物料均匀加热；③需要送风、除尘等设备，投资较大；④石墨粒子消耗量大；⑤对1000℃以上的高温炉，布风板不易制作，粒子的流态也更难控制。

常用的是加热元件加热流态粒子炉和电极式流态粒子炉。

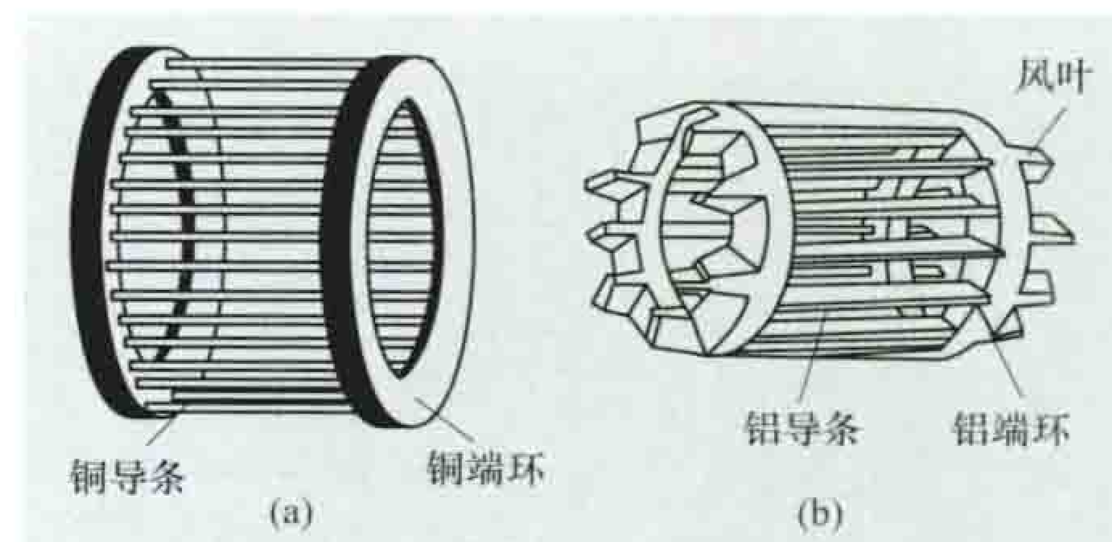
加热元件加热流态粒子炉　主要由炉壳、炉衬、加热元件、炉罐等组成。炉罐多由耐热钢板焊成，加热元件在炉罐外加热，也可在炉膛内加热，炉膛底部设有微孔结构的布风板，所用粒子多采用非导电耐火材料粒子，如刚玉砂、镁砂、铝砂等。工作时，由送气口送入的气体通过布风板驱使粒子处于流动状态，即使之流态化，粒子把热能传给浸没在粒子层中的物料使之加热。流态化气体可根据热处理工艺需要配制，送入的气体可以是空气、煤气、天然气、丙烷以及各种控制气氛（见控制气氛电阻炉），如氮气、吸热式气氛、有机液体裂解气氛等。

电极式流态粒子炉　主要由炉壳、炉衬、电极等组成。电极用低碳钢板或石墨制作。电极式流态粒子炉通过设置在炉膛侧壁上的电极及炉膛内的石墨粒子导电加热。石墨粒子既是加热介质，又是导电发热体。工作时，压缩空气经干燥后进入风室，这样在流态化气体进入布风板前起到缓冲和均压作用。一般风室内的压力可达 5～7kPa，流态化气体从风室通过布风板进入炉膛，布风板采用高铝耐热透气砖，并在其上面铺设 50～70mm 的刚玉砂，其粒度为 30～40 目，它可以保护透气砖并使气体均压。石墨粒子一般由废石墨电极粉碎加工而成，粒子规格为 40～60 目或 60～80 目。由于流态粒子炉的电极间距较大，极间电阻大，一般采用 150V 的直流电源供电。

longxing ganying diandongji

笼型感应电动机

(cage induction motor; squirrel cage induction motor)　二次绕组（即电动机运行时与外部电源不直接连接的绕组）为笼型绕组的感应电动机。笼型绕组为自行闭合的对称多相绕组，它由插入每个转子槽中的导体和两端的环形端环构成。如果去掉铁芯，剩下的绕组外形像个圆笼，因此称为笼型绕组，如图所示。大、中型电动机常用铜条插入转子槽内，再在两端焊上铜端环，如图(a)所示；小型电动机一般都用铸铝转子，转子导体和端环一次铸出，如图(b)所示。笼型感应电动机结构简单、制造方便、经济耐用，所以应用极广。



笼型绕组

(a) 铜条笼型绕组；(b) 铸铝笼型绕组

笼型感应电动机只有在最初起动转矩 $T_{st} \geqslant 1.1\, T_L$（$T_L$ 为起动时的负载转矩）时才能正常起动。电动机起动时除考虑起动转矩外，还应考虑起动电流。普通笼型感应电动机的起动电流倍数 $I_{st}/I_N = 4 \sim 7$，起动转矩倍数 $T_{st}/T_N = 1 \sim 2$。这使得大容量笼型感应电动机或要求重载起动的笼型感应电动机往往不能直接起动。降低最初起动电流的方法有：①降低电源电压；②加大定子侧电阻或电抗；③加大转子侧电阻或电抗。加大最初起动转矩的方法只有适当加大转子电阻，但不能过分，否则最初起动转矩反而可能减小。

笼型感应电动机的转子槽形有单笼、双笼和深槽三种，相应称为单笼型感应电动机、双笼型感应电动机和深槽式感应电动机。一般多采用单笼型感应电动机，如要求具有较高最初起动转矩时，可选用双笼型和深槽式感应电动机，其特点是起动时转子电阻较大，使最初起动转矩增大和最初起动电流减小；正常运行时转子电阻自动变小，使转子铜耗降低。

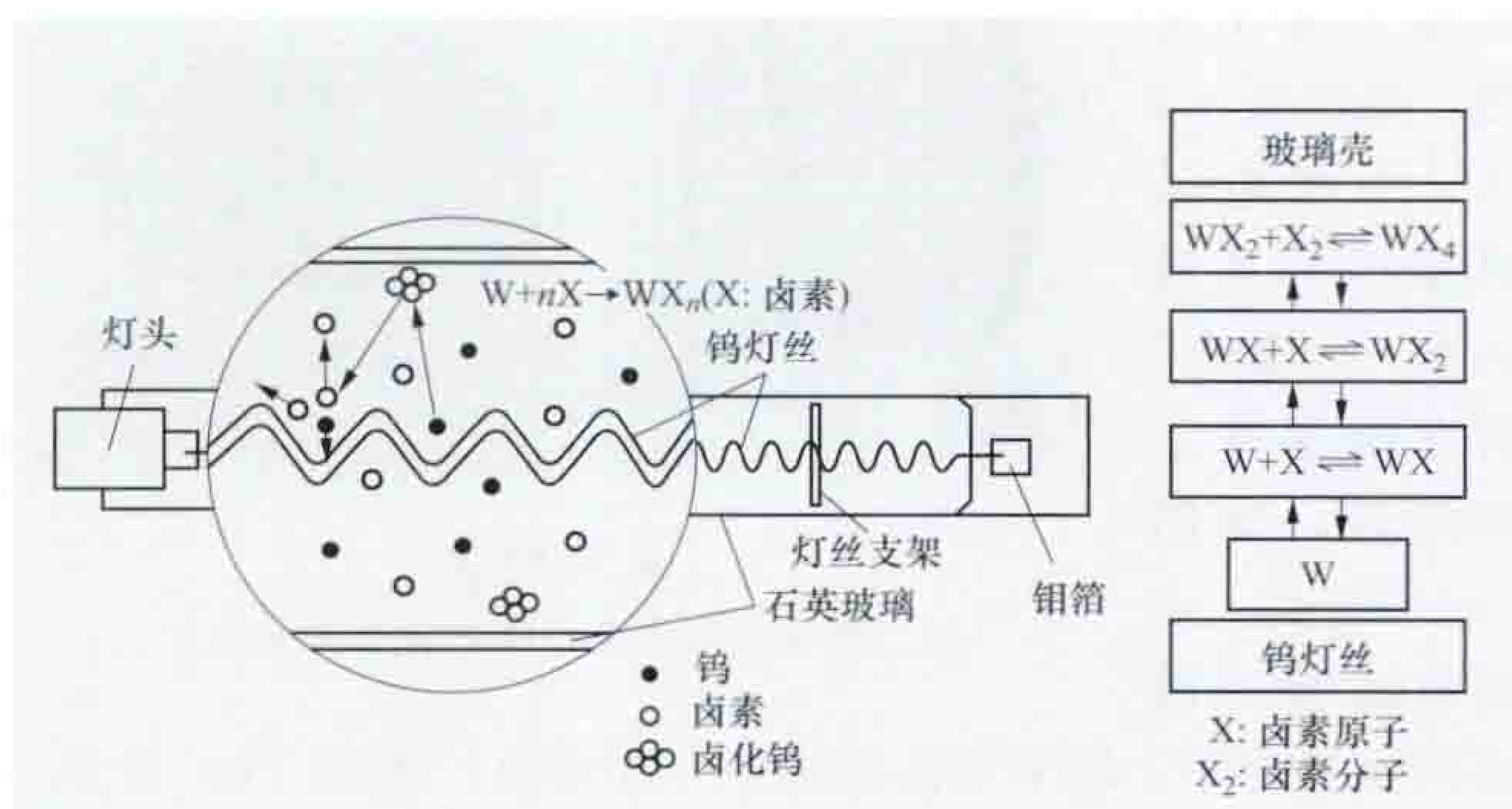
luwudeng

卤钨灯 (tungsten-halogen lamp) 利用玻壳里充填的微量的卤素物质的化学反应来提高发光效率的白炽灯。普通白炽灯在使用过程中，由于从灯丝蒸发出来的钨沉积在灯泡壁上而使玻壳黑化，透光性降低，造成灯泡光效率降低。在卤钨灯泡内除了充入惰性气体外，还充有少量的卤族元素（氟、氯、溴、碘）或与其相应的卤化物，在满足一定温度的条件下，灯泡内能够建立起卤钨再生循环，防止钨沉积在玻璃壳上。卤钨灯的结构和卤素循环模型如图所示。

由图看出，卤钨灯结构的特点是体积小，质量轻，发光体的形状接近点光源或线光源。这对反光器的光学设计是很有利的。

在卤钨灯中，蒸发出来的大部分钨原子和充填的卤素原子或分子在管壁附近发生化学反应，形成卤化钨。卤化钨的蒸气压较高，而灯管内壁具有相当高的温度使卤化钨不能附着在内壁上。卤化钨通过扩散和对流，部分卤化钨在灯丝的高温区被分解，分解出的卤素又和蒸发出来的钨反应，而分解出来的钨则吸附在灯丝表面上。这就是卤钨再生循环的过程。

卤钨的化学反应在一定条件下达到平衡状态，管内壁的黑化现象就可避免。当平衡条件（管壁温度、灯丝温度与充填卤化物的浓度）被破坏，或者是卤素和灯内某一金属部件发生反应，管内壁就会黑化。如果管内壁保持一定的温度，生成的钨和卤化物不能附着在管壁上；同时在管壁附近，钨的卤化物不会被热分解，管壁也不会发黑。



卤钨灯的结构和卤素循环模型示意图

一般卤钨灯的管壁温度在250℃以上。由于碘的化学活性较弱，不会腐蚀灯丝和支架等温度较低的部分，所以在长寿命、低光效的卤钨灯中，通常用碘作为充填卤化物。在高光效卤钨灯中，则充填活性强的溴、氯或它们的化合物等。

卤钨灯和白炽灯比，发光效率提高30%，在发光效率相同的情况下，寿命提高4倍，而且灯的显色性好，启动和调光简单方便，灯的功率可做到几十瓦至几千瓦，甚至更高。卤钨灯在民用和公共建筑照明、交通照明和影视照明等方面得到了广泛的应用。

参考书目

周太明．光源原理与设计．2版．上海：复旦大学出版社，2006.

lüdianjie

铝电解 (aluminium electrolysis) 利用熔盐电解提取金属铝的电冶金过程。电解体系（见电化学）中的电解质为多组分盐的熔融体，高温操作、消耗大量电能是其特点。因此，选择可靠电源和节约电能始终是被关注的问题。图1所示为电解铝生产线。



图1 电解铝生产线

原理 以氧化铝为原料、冰晶石为熔剂、各种添加剂等组成的多组分盐为电解质，加入电解槽内，通直流电，在950～970℃下熔融，使电解质中的氧化铝分解。在阴极析出液态铝汇集在槽底，真空抽出铝液，经净化，澄清，除氢、非金属和金属杂质后铸成铝锭。在阳极析出CO_2和CO气体。阳极气体中含有氟化氢等有害气体，可用湿法或干法净化处理，以满足环境保护要求。湿法用碱溶液洗涤后合成冰晶石；干法则用氧化铝吸附，载氟氧化铝返回电解槽作电解原料。

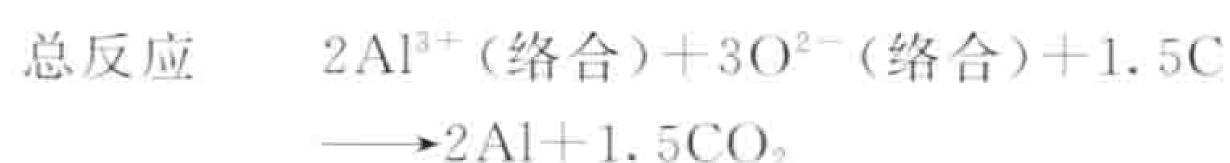
冰晶石-氧化铝熔体具有离子结构，其阳离子有Na^+和少量Al^{3+}，阴离子为AlF_6^{3-}、AlF_4^-、F^-、Al-O-F络合离子及少量O^{2-}。其主要析出反应为



阴极 $2Al^{3+}(络合)+6e \longrightarrow 2Al$



阳极 $2O^{2-}(络合)+C-4e \longrightarrow CO_2$



总反应 $2Al^{3+}(络合)+3O^{2-}(络合)+1.5C \longrightarrow 2Al+1.5CO_2$

铝电解槽的槽电压随槽型和电流强度的不同而不同，一般为4～4.5V，槽电流强度为60～600kA，电流效率为88%～96%，每吨电解铝消耗直流电能13 000～13 500kW·h，交流综合电耗14 000～15 000kW·h。

铝电解体系 由阳极、阴极、电解质、电解槽和直流电源等组成。

（1）阳极。按结构不同分为预焙阳极和自焙阳极两种。主要材料都是石油焦和沥青。预焙阳极以石油焦、沥青焦为骨料，沥青为黏结剂压制成型，经过焙烧固化而成。自焙阳极是利用流经电解槽内的电流产生的焦耳热将以石油焦、沥青焦为骨料，沥青为黏结剂压制成的阳极糊焙烧热解固化而成。

（2）阴极。将以石油焦、无烟煤为骨料，沥青为黏结剂的糊体压制成型，然后焙烧成阴极炭块，砌衬在槽壳的底部形成。

（3）电解质。由Na_3AlF_6、Al_2O_3及添加剂如氟化物（铝、镁、钙、锂）等多组分盐组成。采用多组分电解质和加入添加剂的目的是降低槽温，提高电解质的电导率，提高电流效率，降低电解质的蒸发损失。

（4）电解槽。电解槽槽壳由钢板制成，其内部衬以耐火材料。按阳极形式可分为预焙阳极槽和自焙阳极槽两种；按打壳加料方式划分，预焙阳极槽又可分为边部加料和中间加料两种，见图 2；按导电方式划分，自焙阳极槽又分为旁插导电和上插导电两种，见图 3。

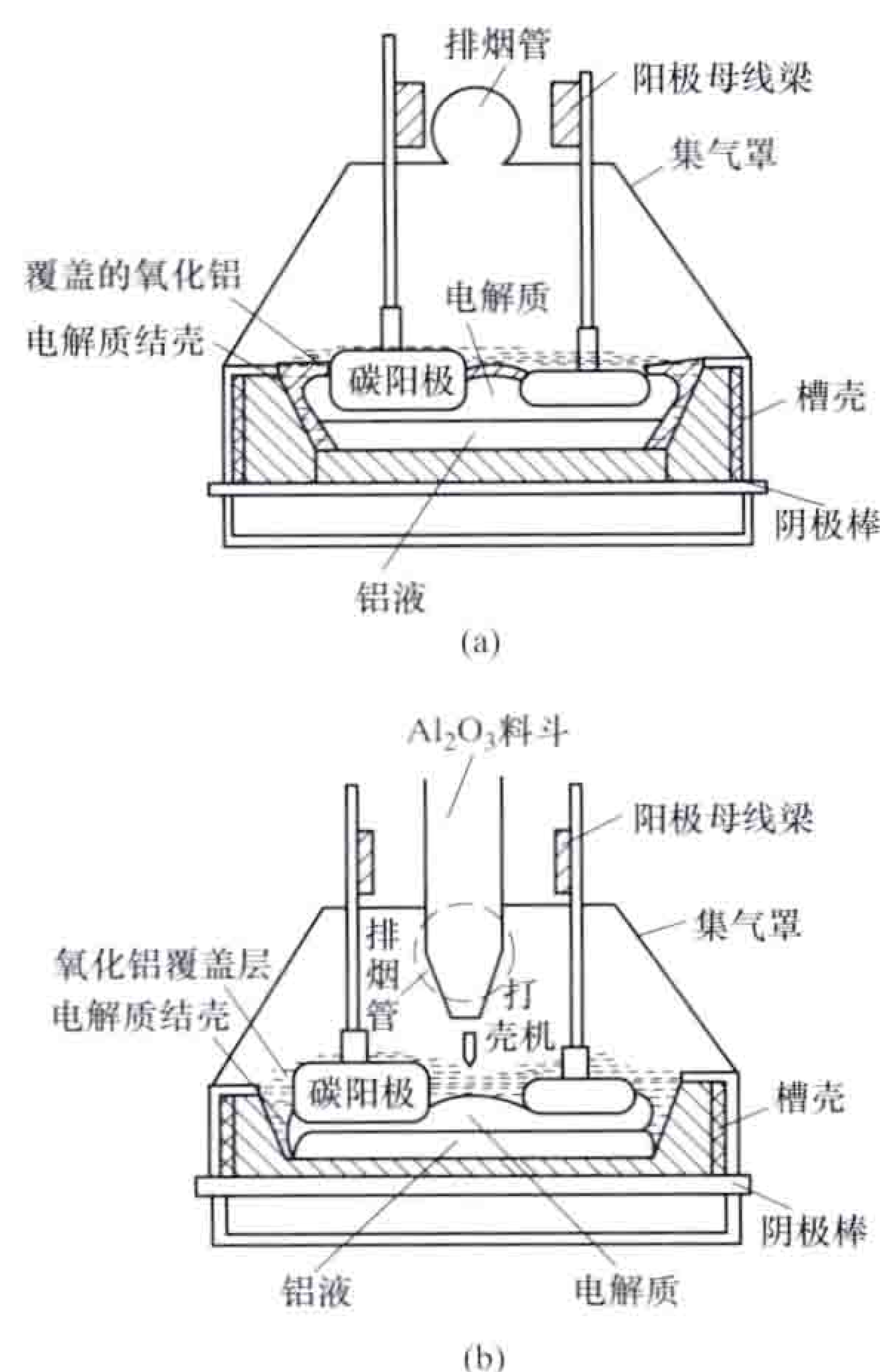


图 2　预焙阳极槽构造示意图
（a）边部加料；（b）中间加料

现代铝电解已基本淘汰了自焙阳极铝电解槽，主要采用容量在 160kA 以上的大型预焙阳极铝电解槽。

（5）直流电源。铝电解要求用直流电源。整流设备多采用大功率硅半导体整流器。铝电解工艺要求有连续、可靠的电源，停电会导致发生电解质冻结和破坏电解槽内衬的严重事故。

在铝电解生产中，是将许多同一类型的电解槽串联起来，组成电解槽系列，每台电解槽的电流均相等，电解槽系列的槽数取决于所要求的产能与电流强度，此外，还与供电、整流的功率有关。

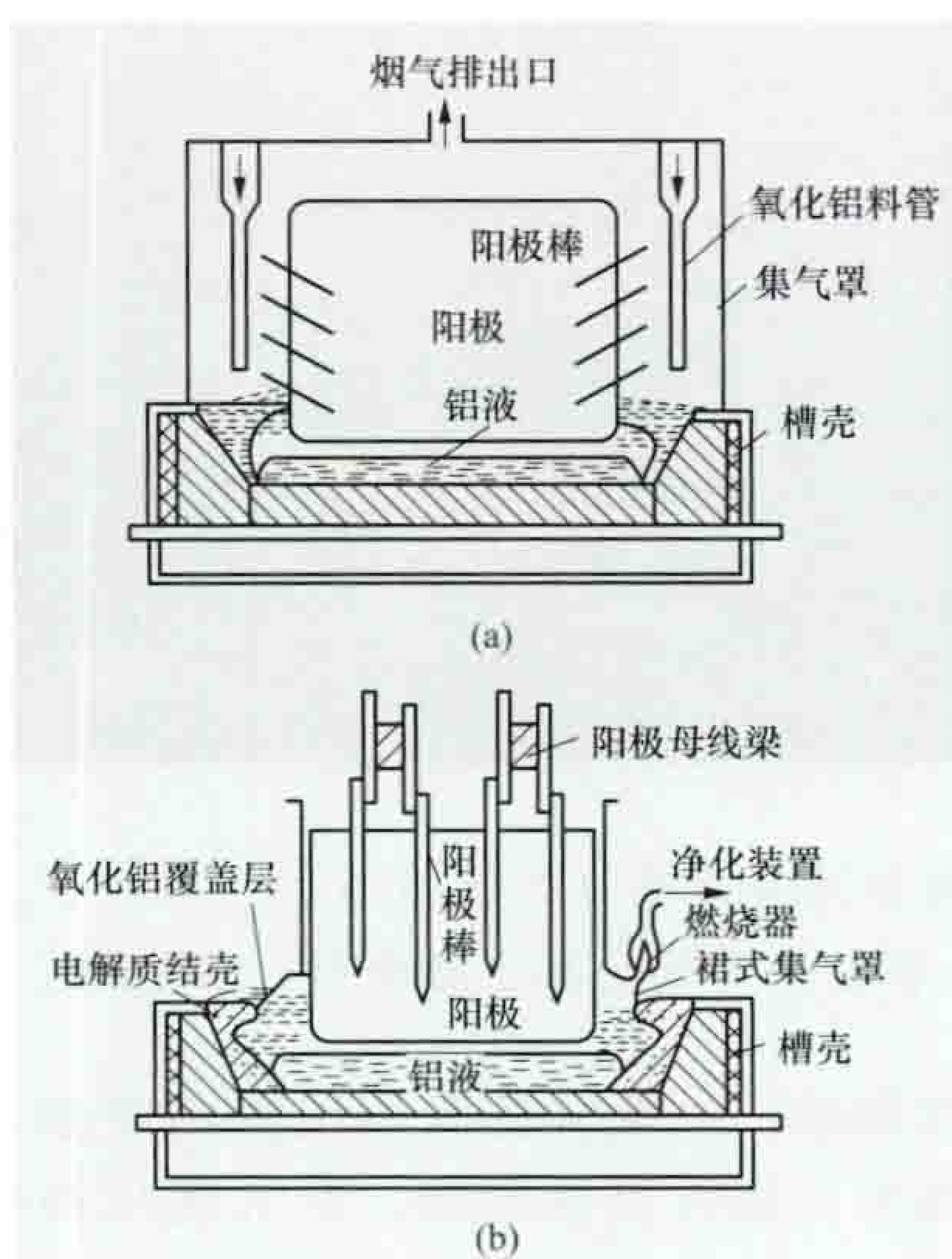


图 3　自焙阳极槽构造示意图
（a）旁插导电；（b）上插导电

节能措施　铝电解是高耗能工业，降低电能损耗一直是铝电解工业追求的目标和任务。主要的节能措施和途径有：①改进结构和操作技术条件。采用耐高温、防电解质渗透和保温性能好的材料作内衬材料，以延长内衬寿命和加强保温，减少热损失。添加锂、镁等复合盐以降低电解质温度，提高电导率，从而提高电流效率，降低电能消耗。保温、长寿命和低温电解是降低电能消耗的有效措施。②采用高效、节能的大容量铝电解槽配套技术。世界先进的铝电解槽配套技术包括：180～600kA 的中心加料预焙阳极电解槽、分布式电子计算机过程控制系统和干法烟气净化系统，电流效率为 93%～96%，直流电能损耗降到 12 900～13 200kW·h/t。③采用高效、节能的直流硅整流器，提高电流传输效率。普遍采用大功率硅整流器，整流效率达 97%～98%。采用低阳极电流密度（0.7～0.75A/cm²）和低母线电流密度（0.25～0.35A/mm²），缩短电解槽间的中心距离，从而大大减少线路电阻，达到降低电耗的目的。④保证连续、稳定和可靠的供电，是减少事故和提高电解效率的根本保证。铝电解厂的一级负荷（见用电负荷级别）占总负荷的 95%。铝电解厂不允许停电。

中国工程院院士邱竹贤及其课题组从 1959 年开始研究低温铝电解，采用纯氯化物、氟-氯化合物、纯氟化物等电解质体系，通过添加氧化铝，在 750～900℃下成功进行电解。通过降低电解温度，可以提高电流效率，减少电能消耗，还可以延长电解槽寿命。中国冯乃祥提出的节能环保铝电解新技术——集成异型阴极电解铝技术，采用异型阴极电解槽，每吨铝直流电耗可以降低 800～1000kW·h，在铝电解生产节能减排上取得重大突破。

发展简史　金属铝早先是用化学方法提取的。1825 年，丹麦人 H.C. 奥斯特（H.C. Oersted）用钾汞齐加热还原无水氯化铝获得金属铝。1845 年德国人本生（Bunsen）以蓄电池作电源，电解 $NaCl-AlCl_3$ 熔盐制得金属铝。现代工业制铝法是 1886 年美国人 C.M. 霍耳（Charles Martin Hall，1863—1914）和法国人 P.L.T. 埃鲁（Paul Louis Toussaint Heroult，1863—1914）同时发明的，统称霍耳-埃鲁法，该法直至现在仍为主要的工业炼铝方法。百多年来，炼铝的基本原理没有变化，但在电解槽槽型、电极形式、电解技术、整流设备上都有很大改进。

参考书目

邱竹贤．预焙槽炼铝．北京：冶金工业出版社，2004.
冯乃祥．铝电解．北京：化学工业出版社，2008.
刘业翔，李劼．现代铝电解．北京：冶金工业出版社，2008.

lüse zhaoming

绿色照明　（green lights）　为节约能源，保护环境，有利于提高人们生产、工作、学习效率和生活质量，促进身心健康而设置的照明系统。1991 年 1 月美国环保局（EPA）首先提出“绿色照明（green lights）”和推进“绿色照明计划（green lights program）”的概念，并采用民间合作的方式实施、推广，取得良好成效。同时也很快得到联合国等国际组织机构的关注和支持，许多发达国家和部分发展中国家也十分重视，积极采取相应的政策和技术措施，推进绿色照明计划的实施和发展。

中国自 1996 年实施《中国绿色照明工程实施方案》以来，已取得初步成效。实施绿色照明的目的，就是节约能源、保护环境和提高照明质量。通过科学的电气照明设计，采用效率高、寿命长、安全和性能稳定的照明电器产品，包括电光源、灯用电器附件、灯具（见照明器）、配线器材以及调光控制设备和控制器件，最终实现高效、舒适、安全、经济、有益于环境和提高人们工作、生活、学习的质量以及使人们身心健康并体现现代文明的照明系统。

中国照明用电量约占全社会总用电量的 13%，且以低效照明为主。如果把中国在用的 14 亿只白炽灯全部替换为高效照明光源，每年可节电 480 亿 kW·h，相当于减少二氧化碳排放 4800 万 t，节能减排潜力很大。同时可消减电力

系统峰荷 10 000MW，相当于少建 12 000MW 装机容量的电站。

主要技术措施 实施绿色照明的主要技术措施是照明节能措施。它必须从组成照明系统的各个因素中提出。这些因素包括推广使用高光效光源，采用高效率节能灯具，推广电子镇流器，同时还要考虑照明设计节能、照明控制节能和充分利用天然光。例如，国家体育场“鸟巢”和上海世博会场馆，均采用高效光源，积极推广绿色照明，见图 1 和图 2。



图 1 国家体育场“鸟巢”夜景

推广使用高光效光源 各种光源的光效：白炽灯为 9～34lm/W，高压汞灯为 39～54lm/W，荧光灯为 45～103lm/W，金属卤化物灯为 65～106lm/W，高压钠灯为 55～136lm/W，发光二极管灯为 55～120lm/W。因此，要合理选用光源，主要措施是：①尽量减少白炽灯的使用量。白炽灯因其价格低廉，安装使用方便，在世界上的使用量仍占首位，但其光效低、能耗大、寿命短，应尽量减少使用量，在一些场所应禁止使用白炽灯，无特殊需要不应采用 150W 以上的大功率白炽灯；如需采用白炽灯，宜采用光效较高的双螺旋白炽灯、充氪白炽灯、涂反射层白炽灯或小功率高效卤钨灯。②推广使用细管径和紧凑型荧光灯。荧光灯光效较高，寿命长，重点推广细管径（26mm）的荧光灯和各种形状的紧凑型荧光灯以替代粗管径（38mm）的荧光灯和白炽灯；逐步减少高压汞灯的使用量。③推广高光效和长寿命的高压钠灯和金属卤化物灯。其光效分别为 120lm/W 和 90lm/W 以上，寿命达 1 万 h。④条件成熟时大力推广发光二极管灯照明。其光效将远远超过 100lm/W，寿命达 3 万 h。

采用高效率节能灯具 包括选用直接型灯具、控光合理的灯具和光通量维持率高的灯具。①在满足眩光限制要求下，应选择直接型灯具，其中宽配光灯具效率为 75%～85%，窄配光灯具效率为 66%～75%。室内灯具效率不宜低于 70%，室外灯具不宜低于 55%。②采用控光合理的灯具，如多平面反光镜定向射灯、蝠翼式配光灯具、块板式灯具等。③选用光通量维持率高的灯具。

推广电子镇流器 电子镇流器具有功耗小、易启动、噪声小、温升低、质量轻、无频闪等优点，比电感镇流器节电 10%以上。

照明设计节能 包括：①正确选用照度标准中高、中、低三档照度值，按不同的工作区域确定不同的照度。②选用合适的照明方式，尽量采用混合照明方式，少采用一般照明方式，适当采用分区一般照明方式。③采用照明与空调一体化灯具。

照明控制节能 根据天然光变化，控制照明点亮范围；可采取分区控制和适当增加照明开关点；采用各种节电开关、自动控光装置和管理措施。

充分利用天然光 利用定日镜、光纤和导光管等集光系统进行采光。在建筑上采用顶部天窗采光、天井空间采光或屋顶上充气薄膜屋面采光等。

展望 随着人们对节约能源和保护环境认识的提高，必将进一步地开展绿色照明工程。世界各国都充分发挥政府部门、中介机构和生产企业的作用，通过制定和完善照度标准，加强绿色照明工程的管理；在绿色照明工程实施中，通过引导消费，扩大优质高效照明电器产品的份额，加快有效照明产品的推广和应用；实施绿色照明示范工程。



图 2 上海世博会夜景（2010 年 5 月 1 日～10 月 31 日，第 41 届世界博览会在上海举行）（陈怡刚 摄）



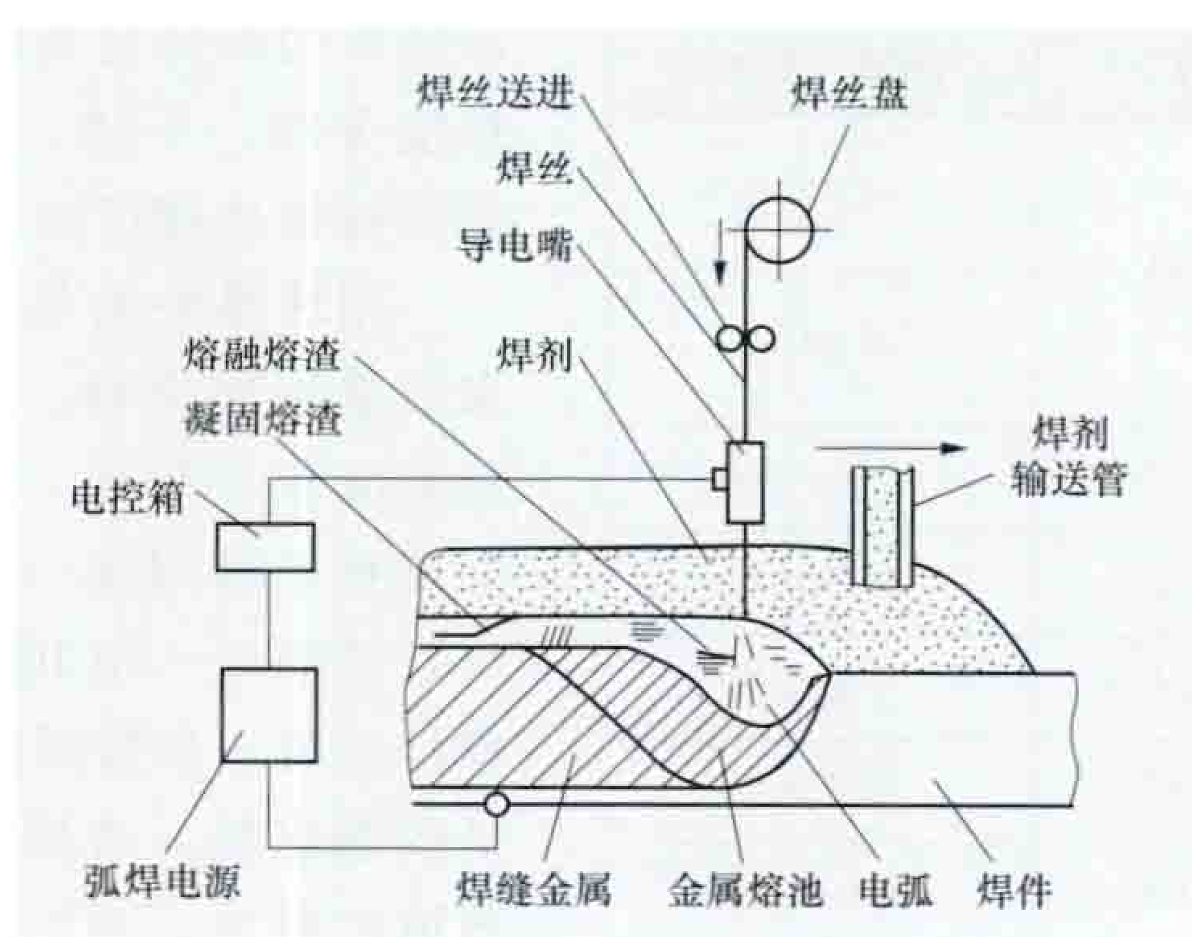
maihuhan

埋弧焊 (submerged arc welding) 利用在焊剂层下燃烧的电弧进行焊接的电弧焊。可用于碳钢、低合金钢、耐热钢、不锈钢，以及镍和镍合金等的焊接，特别适合于焊接这些材料的中、厚板材的直线、环形或形状规则的接缝。由于焊接电流高达600～2000A，因此焊接生产率高。因熔渣隔绝空气的保护效果好，同时焊接参数可通过自动调节保持稳定，因此，焊缝内部缺陷少，机械性能优良，外表光滑美观，焊接时无弧光辐射和金属飞溅，烟尘较少，操作者劳动强度较轻。

埋弧焊依靠焊剂堆积形成保护条件，因此主要用于平焊位置或角焊缝的横焊位置。

埋弧焊在短接缝、小直径环缝以及处于狭窄位置的焊缝的应用受到一定限制。另外，因所用焊剂的成分主要是金属及非金属氧化物，难以用来焊接铝、钛等氧化性强的金属及其合金。

原理　如图所示，在焊接过程中，由焊丝与焊件之间产生的电弧加热焊丝、焊剂和焊件，并由陆续送入的焊丝提供填充金属。焊剂熔化后产生的熔渣覆盖在电弧和液态金属上，起保护、净化熔池，稳定电弧和渗入合金的作用。焊剂和熔融金属之间发生的冶金反应对焊缝金属的化学成分和性能产生重要影响，为获得性能符合要求的焊缝，应正确选配焊剂和焊丝。



埋弧焊示意图

采用多根焊丝或带状电极，或对焊丝进行预热或向熔池送进冷或热的焊丝，向焊缝中填加金属粉末等特殊形式的埋弧焊，可起到提高生产效率或控制焊接质量的作用。

焊接设备　埋弧焊设备有自动焊机和半自动焊机两种。自动埋弧焊机主要由弧焊电源、控制箱、送丝机构、焊机行走机构和焊剂输送机构等部分组成。弧焊电源一般应具有陡降外特性，可用交流或直流。采用稳弧性差的焊剂或对焊接工艺参数稳定性有较高要求时，宜用直流电源。用细焊丝焊薄板时，宜用直流平特性电源。半自动埋弧焊机与自动埋弧焊机相似，有送丝机构和焊剂输送机构，但焊枪由人工操纵。

自动埋弧焊在造船、化工容器、锅炉、桥梁、起重机械、工程机械、铁路车辆以及石油和冶金等设备制造业中应用广泛，是焊接生产中最普遍使用的焊接方法之一，也是在工业领域最早得到应用的机械化焊接方法。

maihulu

埋弧炉 (submerged arc furnace) 电极埋在炉料中的电弧炉，又称电弧电阻炉。埋弧炉的特点是炉料呈颗料或粉末状，工作时电极埋在炉料内部加热。加热炉料的热能一部分来自电极与炉料间的电弧热（见电弧加热），一部分来自电流流经炉料所产生的电阻热（见电阻加热）。这是一类耗电量大的电弧炉，主要用于用焦炭还原矿石，生产铁合金（主要是锰铁、硅铁、铬铁、镍铁）、金属硅、钛渣、电熔刚玉、冰铜、电石、黄磷等。图1所示为25.5MV·A钛渣炉出渣现场。

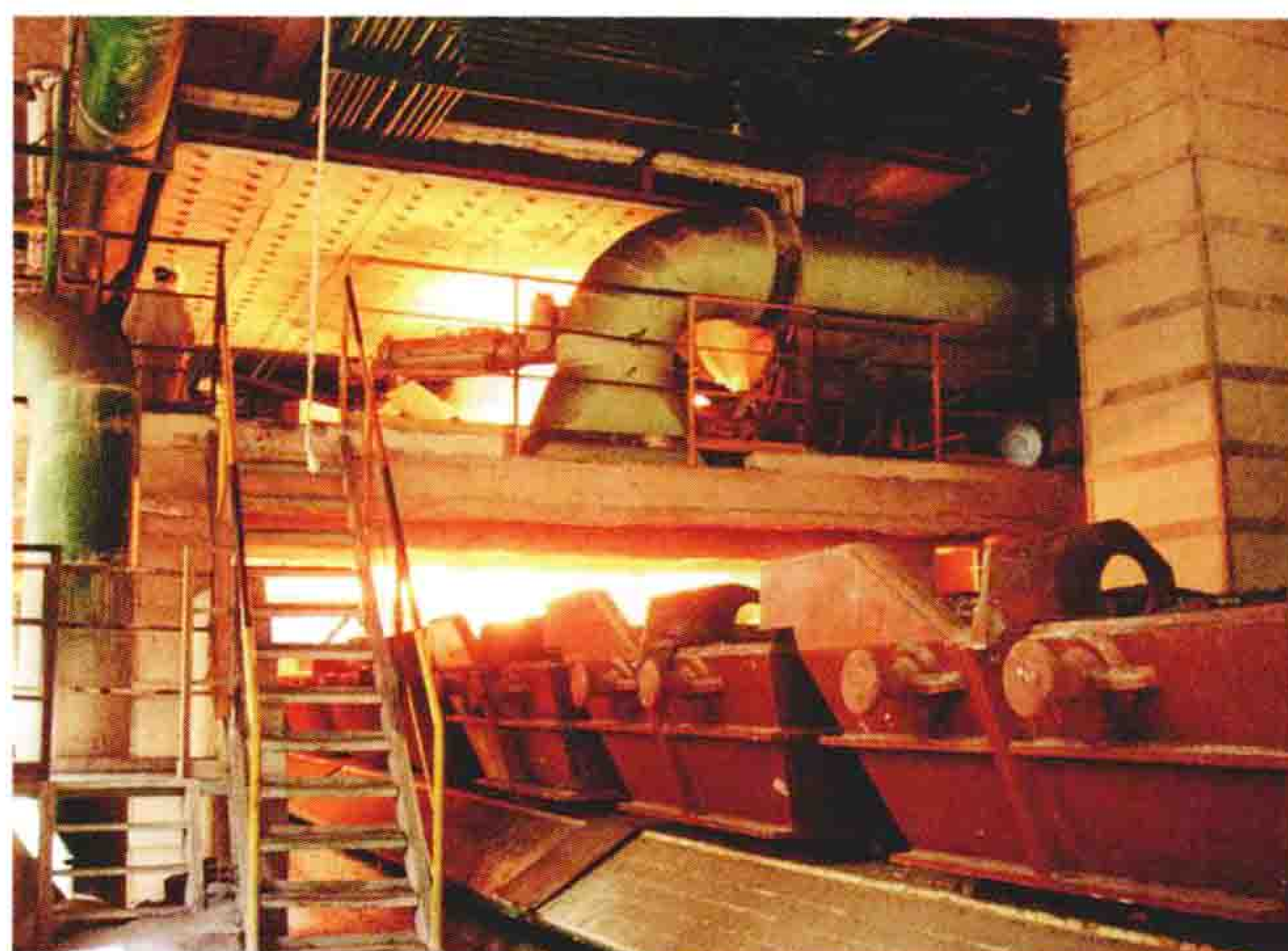


图1　25.5MV·A钛渣炉出渣现场

分类　埋弧炉通常按用途分类，其规格大小按所配用的电炉变压器的容量表示，小则几百千伏安，大的可近十万千伏安。各类埋弧炉的炉名、所用原料、产品名称、反应温度和电耗见下表。埋弧炉的电耗随原料成分、炉子容量而有很大差异。通常炉子容量愈大，电耗愈低。

设备构成　埋弧炉的结构形式很多，使用最广的铁合金炉装置由炉体、电极系统、供电系统、加料和出料设备、控制系统、除尘设备等部分组成，如图2所示。

炉体　多数埋弧炉的炉体呈圆筒形或圆锥形，少数炉子如大型锰铁炉、冰铜炉、钛渣炉的炉体呈长方形，也有呈方形或椭圆形的。炉体多数为钢板外壳，内侧有用耐火砖和（或）碳砖砌成的炉衬。炉体按产品种类和容量大小有固定和旋转两种。多数炉子的炉体是固定的，见图2（a）和图2（b）。某些大型铁合金炉，如硅铁炉，常采用炉体回转或来回转动的结构，以消除炉料的搭挂，减少炉料结壳，扩大反应区并有利于炉气的排出，见图2（c），以很低的速度旋转，现已很少应用。炉顶有敞口、封闭和半封闭3种形式。早期的埋弧炉是敞口式的，见图2（a）。由于矿石还原会产生大量的一氧化碳等气体，随着环境保护要求的提高和余热

利用技术的进步，对不同用途的埋弧炉分别采用了封闭式［见图2（b）］，或矮烟罩半封闭式的炉顶［见图2（c）］。半封闭式炉在烟罩下设有可调节开启度的炉门，以调节吸入的空气量和烟气温度。

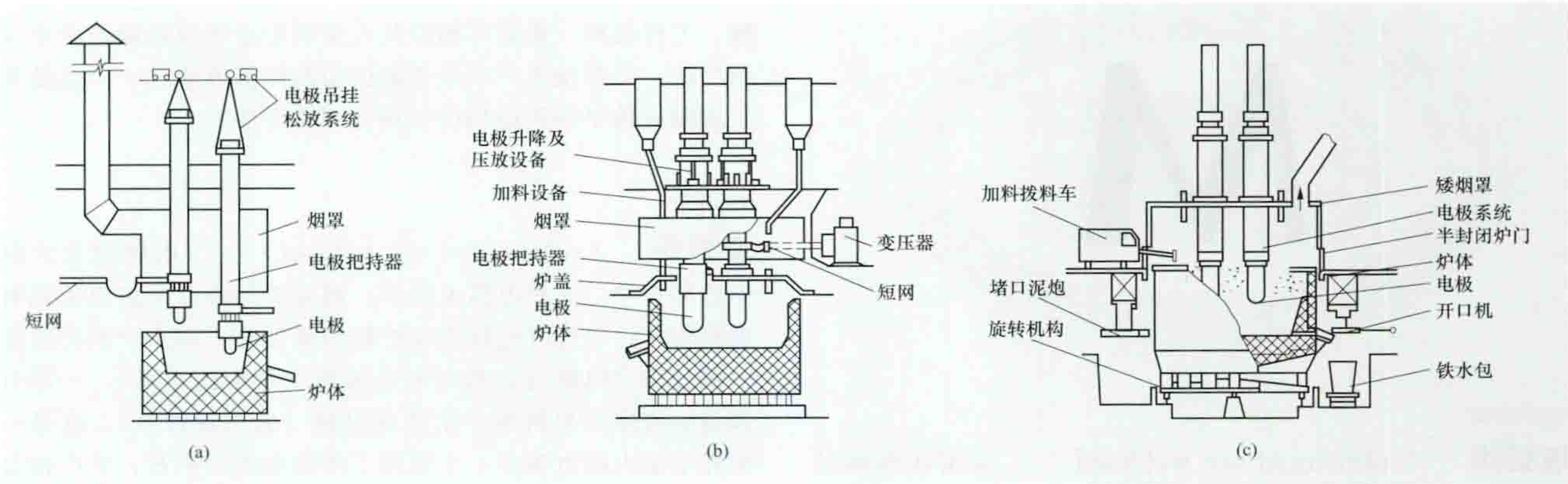


图2　几种埋弧炉示意图

(a) 敞口固定式；(b) 封闭固定式；(c) 半封闭旋转式

电极系统　埋弧炉所用电极多数为自焙电极，即依靠炉子本身热能熔烧成的电极，也有用碳素电极和石墨电极的（见电弧炉电极）。对圆形炉体，三相电极呈三角形对称布置在炉膛内；对矩形或椭圆形炉体，电极一般布置在一条直线上。为了弥补炉内电极的消耗，自焙电极配有电极松放或压放设备；为调节电炉的输入功率和电流，电极配有升降调节器（见电弧炉电极调节器）。

供电系统　埋弧炉多数由工频交流供电，少数也有用直流供电的。交流炉大部分是三相供电，个别小容量的采用单相，并用两根电极构成电流回路。埋弧炉工作电压低（一般为80～300V）、电流大（几千安培到十几万安培）。交流炉由电炉变压器供电。直流炉则是由包括整流变压器等在内的大功率整流设备供电，输出电压可调。对于交流炉，为提高炉子的功率因数、减小线路损耗，应尽可能减小大电流线路的电阻和电抗，特别是电抗，并力求三相平衡。为此，三相交流埋弧炉的大电流线路通常在电极上接成三角形接线（见短网）。三相埋弧炉可由一台三相变压器供电，但大容量者也常由3台单相变压器供电。在后一情况下，对圆形炉体的炉子，3台变压器对称地布置在炉子周围，设备占地面积虽较大，但有利于减小线路阻抗和三相阻抗不平衡度，对炉子的运行有利。

加料和出料设备　埋弧炉一般从炉顶加料。除少数小型炉由人工加料外，多数采用机械加料的间断加料方式。现代大型埋弧炉的加料设备配有原料破碎、粒度分级、干燥、预热、预还原等原料预处理设施。

埋弧炉类别及简况

类别			主要原料	产品	反应温度（℃）	电耗（kW·h/t）
铁合金炉	硅铁炉	45%硅	硅石、废铁、焦炭	硅铁	>1700	～5000
		75%硅				～8700
	锰铁炉		锰矿石、废铁、焦炭、石灰	锰铁	1300～1400	2600～3000
	铬铁炉		铬矿石、硅石、焦炭	铬铁	>1750	～3000
	钨铁炉		钨精矿石、焦炭	钨铁	2400～2900	～2800
	硅铬炉		铬铁、硅石、焦炭	硅铬合金	1600～1750	～5000
	硅锰炉		锰矿石、硅石、废铁、焦炭	硅锰合金	1350～1400	3500～6000
	硅钙炉		硅石、石灰、焦炭	硅钙合金	>1600	11000～14000
炼铁电炉			铁矿石、焦炭	生铁	1500～1600	1800～2500
金属硅炉			硅石、石油、焦炭	金属硅	>2000	>13000
冰铜炉			铜矿石、焦炭	冰铜	1500～1550	700～800
电石炉			生石灰、焦炭	电石	2000～2300	2900～3600
碳化硼炉			氧化硼、焦炭	碳化硼	1800～2500	～20000
电熔刚玉炉			铝土矿石、焦炭	电熔刚玉	>1800	1400～3000
黄磷炉			磷钙石或磷灰石、硅石、焦炭	磷	1450～1500	10000～17000
磷肥炉			磷矿石、铁合金渣、蛇纹石	磷肥	1400～1450	
氰盐炉			氰氨化钙、氯化钠	氰盐混料	1400～1500	～900

用埋弧炉冶炼得到的制成品多数呈液态出料。在冶炼过程中料液沉积在炉底，炉底适当高度上设有平时用堵口泥封住的出料口，每隔2～6h用开口机打通出料口出料。少数制成品，如钨铁，呈固态出料，冶炼结束后拆去炉墙取出料块。有的制成品呈气态出料，如黄磷，用管道收集产品。

控制系统　采用可编程控制器系统对埋弧炉各部的动作进行综合控制，包括变压器抽头切换和电极升降控制、电极压放控制、电极深度控制、上料与称量控制等。

除尘设备　标准状态下，封闭式炉中平均每吨产品产生500～1000m³炉气，含粉尘20～100g/m³。敞口式炉由于反应气体在炉口燃烧

形成高温吸入周围大量空气，炉气量增大60～100倍。炉气用排烟罩排除。敞口式炉用布袋或静电除尘器除尘；封闭式炉则主要采用湿式除尘法除尘。

历史与发展 1894年法国首先研制成工业生产用电石炉。1909年，挪威电气化学公司C. W. 索德伯克（C. W. Soderberg）开发了自焙电极。1922年，泰兰德（Tyland）成功地制造了世界上第一台自焙电极式500kW炼铁用实验炉。20世纪50年代以前，炉子容量为几百千伏安到几万千伏安。70年代，炉子的容量日趋大型化，最大的封闭式铁合金炉达75 000kV·A，半封闭式炉达96 000 kV·A，供电、加料、控制、除尘等设施的技术水平相应提高，电子计算机开始得到应用。1991年，挪威埃肯公司设计制造了半封闭式105MV·A铬铁合金电炉。

中国于1958年开始设计制造埋弧炉。20世纪末中国已有40 000kV·A电石炉、25 500kV·A锰铁炉、31 500kV·A硅锰合金炉、16 500kV·A冰铜炉和50 000kV·A硅铁炉等大型埋弧炉在顺利运行，设计制造能力已接近发达国家水平。埋弧炉正在向多用途、大容量、高生产率、节能降耗、炉气综合利用、减少环境污染和新型电极自动调节器及计算机控制与管理的方向发展。

Meiguo nongcun dianqihua

美国农村电气化（rural electrification in the United States of America） 美国农村用电率与用电水平的综合反映。美国1898年开始用电动水泵灌溉农田，但此后发展缓慢，到1935年仅有10.9%的农场通电。1933年，富兰克林·罗斯福总统提出联邦政府扶持农村实施电气化的主张。1935年5月美国总统签署一项政府令，规定在美国农村普遍发展为用户自有的农村电力合作社，并由政府向合作社发放长期低息贷款。同时，组建独立的政府贷款机构——农村电气化管理局（REA，简称农电局）。1936年5月，美国总统又签署《农村电气化法》，并赋予农电局长期管理职能，持续不断地为农村电气化提供资金扶持和技术服务，政府提供为期35年、利率2%的长期低息贷款（亦做政策性贷款），保证了农村电力系统为人口稀少的农村地区提供电力服务。1942年，成立全美农村电力合作社协会（NRECA，简称合作社协会），并为农村电力合作社的发展提供多种服务。经过20年的发展，到1957年，美国农村基本实现电气化，通电农村、农庄比例达96.4%，全国农村用电量为245.6亿kW·h，占全国用电量的3.8%。1969年，又组建全国农村合作银行，亦称农电发展基金会（CFC，简称合作银行），为农电发展开拓了政府贷款以外的另一条资金来源渠道。此外，农电局还增加了为农村电力合作社从其他银行贷款提供担保的业务。1987年，美国农村地区通电农场和通电农户均达到98.8%，年用电量达2022亿kW·h，占全国总用电量的7.2%。20世纪最后10年，美国农电继续发展，截至1997年，美国农村年用电量增至2630亿kW·h，占全国总用电量的8%，农村年人均用电量达8219kW·h。农村电力系统从四个联邦政府拥有的电力企业购买约31%的电力，从私人电力企业购买约22%的电力，由农村电力合作社自己提供约46%的电力。农村电力合作社拥有30 000MW的发电容量，约300亿美元资产，燃煤机组25 000MW，核电机组3000MW，内燃机1530MW，水电机组110MW。1997年和2007年美国农村用电构成见表1。

表1 1997年和2007年美国农村用电构成（%）

时间	居民用电	商业用电	工业用电	其他
1997年	57.8	17.9	22.0	2.3
2007年	36.5	34.2	27.3	2.0

农村电气化组织机构 包括农电局、合作社协会、合作银行、农村电力合作社。

（1）农电局（REA），后改为农村公用事业服务局（RUS），局长由总统直接任命。在各州设下属机构，州以下各地区设派驻人员。农电局的主要职责：向农电合作社提供政策性贷款，制定农村电气化标准，为农村电气化提供技术和管理服务。

（2）合作社协会（NRECA），以农村电力合作社为会员的民间商业组织。该组织成立初期的主要成就是成功地说服国会和总统继续农村电气化的进程，并推动商业保险进入农村电气化行业，为美国农村电气化的成功提供了有力的保证。合作社协会的主要职责：①通过游说国会、政府，为行业争取有利的立法和优惠贷款。②向农村电力合作社提供管理、技术、公共关系等方面的信息。③组织各种培训，开展咨询服务。④为农村电力合作社提供各类保险业务。⑤进行国际合作。

（3）合作银行（CFC），以农村电力合作社为会员建立起来的自主经营、非营利的金融组织。合作银行的基金来源于多渠道集资：向农村电力合作社社员收取会费，发行各种信用债券，同国内外融资。合作银行无分支机构，依靠与纽约金融市场和全国各种银行建立的信贷往来开展活动。它以农村电力合作社总代表的身份向各银行贷款，再转贷给农村电力合作社。每年可为农村供电提供所需的30%的贷款。合作银行的存款利息高于一般银行，贷款利息低于一般银行。

（4）农村电力合作社，为私人电力用户和企业用户自有，总目标是为供电区范围内提供经济上可以承受的电力供应。农村电力合作社按其经营业务，又分为配电合作社和发输电合作社，均为独立经营的非盈利免交所得税企业。其职责是：建设和管理发电厂和输变电设施，为配电合作社提供廉价电力，并负责向国家和私营电力公司购大宗电力，转供给配电合作社。发输电合作社与配电合作社为协议性的相互合作关系。1997年和2007年美国农村电力合作社基本情况见表2。2007年美国农村电力合作社各类统计指标见表3。

表2 1997年和2007年美国农村电力合作社基本情况

时间	农村总用电户数	占全国总用电户数比例	农村用电人口	供电面积占国土面积比例	农村电力合作社总数	其中：配电合作社	其中：发输电合作社	拥有高、中压线路
1997年	1300万户	11%	3200万人	75%	935个	875个	60个	336万km
2007年	1700万户	12%	4000万人	75%	930个	864个	66个	

表 3　2007 年美国农村电力合作社各类统计指标

名　　称	指　　标
所服务用户占全美比例	12%
发电量占全美比例	5%
配电线路长度占全美比例	42%
输电线路长度占全美比例	6%
服务的主要农庄和农户	58%
其他重要企业用户	42%
每英里服务的最少用户数	7
每英里最小税收	10565 美元

资金来源　①国家长期低息贷款，凡农村电力合作社提出申请，经农电局批准，可以获得国家长期低息贷款。1973 年，美国国会通过的农村电气化修正法案规定，政府贷款额度为农村电力合作社所需贷款总额的 70%，将年利率由原来的 2%改为 5%。②合作银行低息贷款，此种贷款的利率随金融市场利率的升降而调整，但比金融市场的利率要低。③由农电局担保向其他金融单位贷款。④农村电力合作社自筹资金。各农村电力合作社所获盈利自然转入周转金，用于扩大再生产。此项资金的使用，要按各个社员投资的多少，分配到社员账户上，并付给利息。

农村电气化法规制度　在公共设施法规方面，美国政府通常不直接参与公共设施的运行活动，只为公共设施制定一套完善的法律框架。美国公共设施法规允许各级政府享有司法权。1936 年美国颁布了《农村电气化法》，1988 年修改的《农村电气化法》分为三部分：①农村电气化。赋予农村电气化局局长向农村发输配电项目和部分用电项目贷款的权利。②农村电话服务。③农村电力和电话直接贷款程序。明确贷款利息，直接贷款及担保贷款的申报、审批程序。该法律的建立有效地推动了农村电气化建设。凡从 REA 贷款或经 REA 担保贷款建设的电力项目都必须达到相应的技术标准。各州政府负责受理各农村电力合作社调整零售电价申请，根据其经营状况、调整电价原因，经听证会辩论，审批电价，并负责监督执行。

meidianjie

镁电解　（magnesium electrolysis）　利用熔盐电解提取金属镁的冶金过程。炼镁的原料主要有菱镁矿、海水或盐湖的卤水和光卤石，均需先制成氯化镁，然后进行熔盐电解提取金属镁。与铝电解一样，镁电解也是高温操作，并消耗大量电能的工业。

原理　以氯化镁为原料，加入氯化钾、氯化钠、氯化钙、氯化钡的三元或四元混合物作为电解质，加入电解槽内，通直流电熔融为熔体。电解过程中阴、阳极析出反应为



阴极　$Mg^{2+} + 2e \longrightarrow Mg$



阳极　$2Cl^{-} - 2e \longrightarrow Cl_2$

阴极上析出的液态镁，因其密度比电解质的密度小，因而浮于电解质表面；阳极上析出的氯气则经氯气罩排出。

氯化镁的熔点高、易挥发、电导率低、极易水解，因此必须采用多组分电解质电解。通过加入添加剂如氯化钾、氯化钠、氯化钙、氯化钡等改善电解质熔体的熔度、密度、黏度、表面张力和电导率等。

镁电解体系　以阳极、电解质、阴极、直流电源等组成的镁电解体系主要是以镁电解槽和直流电源的形式体现的。

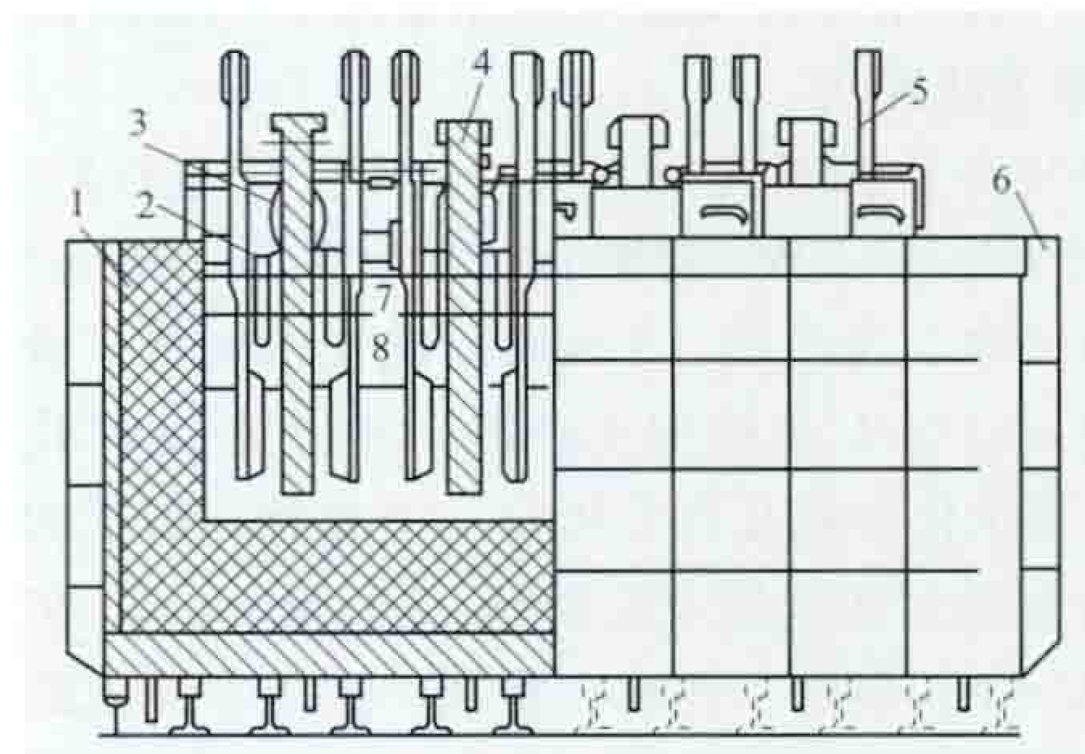


图 1　埃奇型上插阳极有隔板电解槽

1—槽衬；2—隔板；3—氯气罩；4—阳极；5—阴极；6—钢外壳；7，8—电解质最高和最低水平

镁电解工业采用两种类型的电解槽，即有隔板和无隔板电解槽。按导电方式又分为上部插入阳极、侧部插入阳极和下部插入阳极电解槽。工业镁电解槽的主要类型有：埃奇型上插阳极有隔板电解槽、道屋型无隔板电解槽、阿尔肯型无隔板电解槽、双极性电解槽。各种镁电解槽的结构见图 1～图 4。

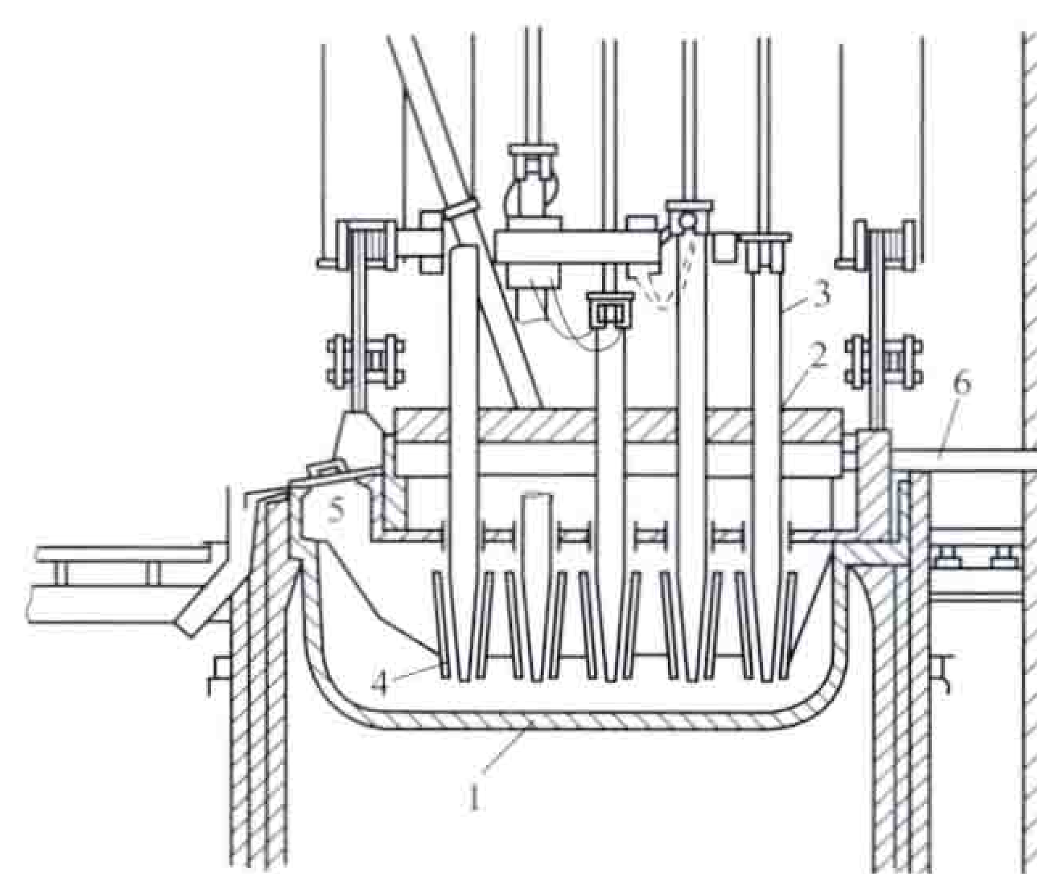


图 2　道屋型无隔板电解槽

1—钢槽；2—陶瓷板；3—阳极；4—阴极；5—出镁口；6—排气口

世界上镁电解工业多采用生产能力高和电能消耗低的无隔板电解槽。现代镁电解生产中一般由多台电解槽串联组成一个系列，每个电解厂房由多个系列组成。各种类型的镁电解槽的技术指标见表。

先进电解槽的容量增至 300～400kA，电流效率提高到 92%～93%，电能效率达 60%以上。

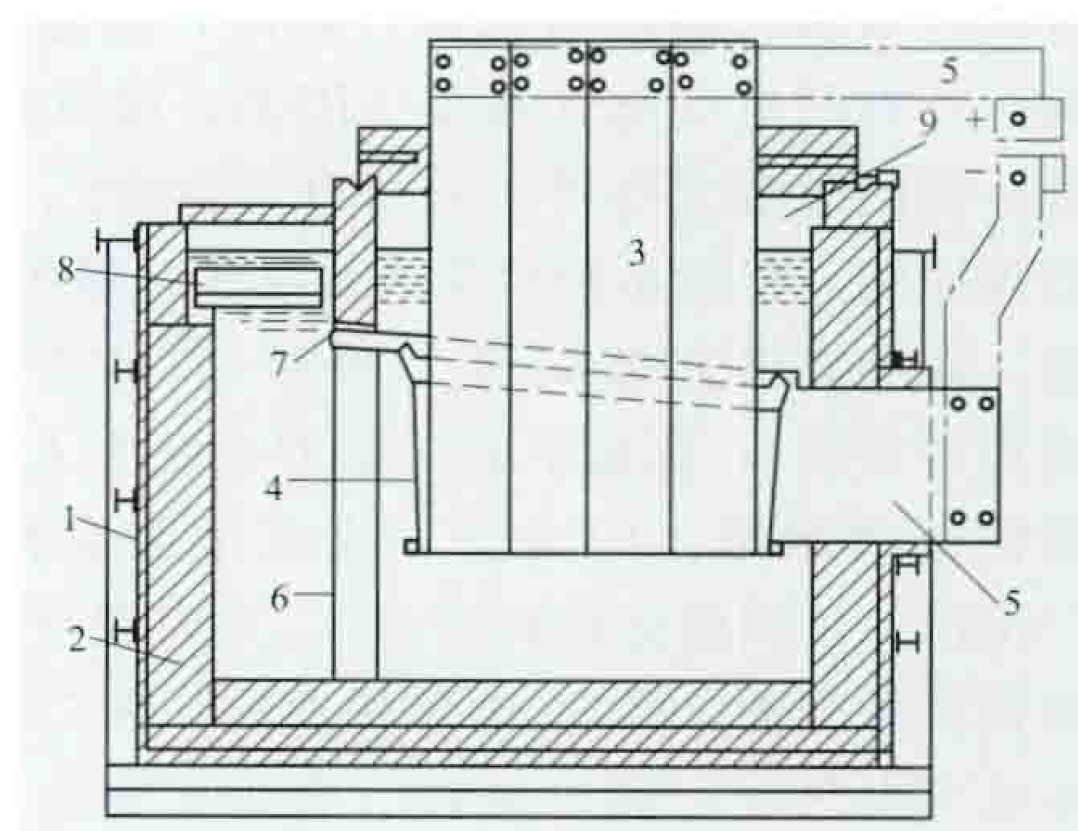


图 3　阿尔肯型无隔板电解槽

1—钢外壳；2—内衬；3—阳极；4—阴极；5—导电板；6—隔墙；7—导镁槽；8—集镁室；9—氯气排出口

直流电源多采用大功率硅整流器。镁电解工艺要求有连续、稳定、可靠的电源，停电将导致电解槽中电解质的冻结并破坏电解槽内衬的严重事故。

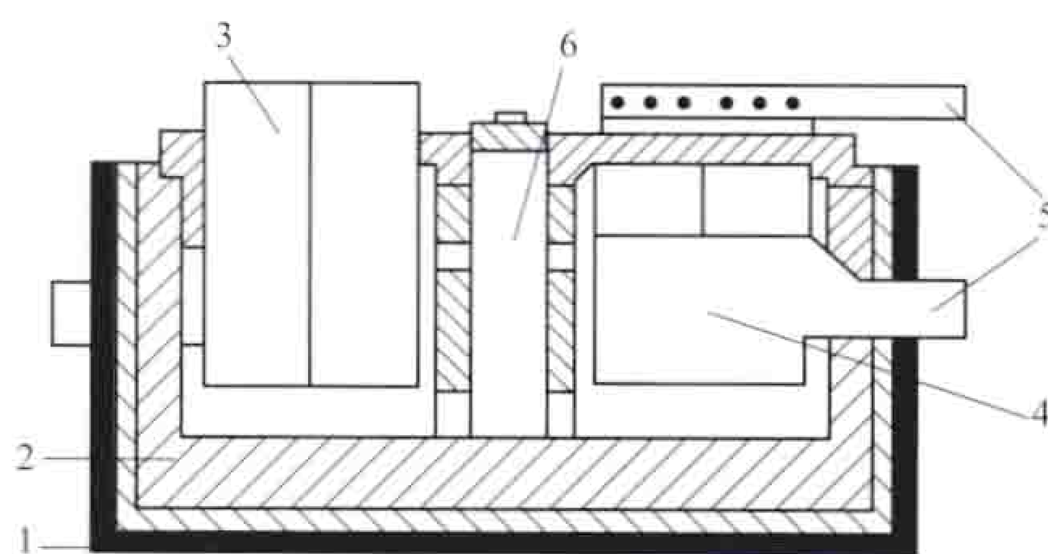


图 4　双极性电解槽

1—钢外壳；2—内衬；3—阳极；4—阴极；5—阴极导电板；6—集镁室

节能措施　镁电解工业为高耗能工业，降低电能损耗始终是其重要课题。降低槽温、加强电解槽保温、改进槽型、提高整流和传输电能效率等是降低能耗的重要途径。

镁电解槽的技术指标

槽　　型	原料	熔融温度（℃）	槽电压（V）	电流强度（kA）	电流效率（%）	直流电耗（kW·h/kg）
埃奇型上插阳极有隔板电解槽	无水氯化镁 无水光卤石	680～720	5.5～7.0	150	80～85	15～18
道屋型无隔板电解槽	含水氯化镁	700～720	6.0	90～110	75～85	16.5～17.5
阿尔肯型无隔板电解槽	无水氯化镁	660～675	5.7～6.0	80～100	90～95	13～13.9
双极性电解槽	熔融氯化镁 光卤石		4.6～4.8	105～150	78～85	9～11

发展简史　1808年最先从氯化镁中分离出镁。1830年，英国物理学家M. 法拉第（Michael Faraday，1791—1867）首先用电解熔融氯化镁法提取金属镁。1860年以后，开始用化学方法生产镁。1886年，美国H.Y. 卡斯特纳（Hamilton Young Castner）首先用电解熔融无水光卤石法进行工业性生产镁。1909年，镁基合金的发明对镁生产的发展产生了重大的影响。第二次世界大战期间，除主要的电解法以外，硅热法制镁也投入了工业化规模的生产。但其生产规模比较小，有85%～90%的镁是用电解法生产的。镁电解工业的发展方向主要是大型化、自动化、改善密封性和降低电能消耗。

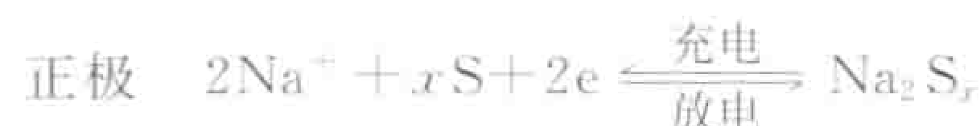
参考书目

张永建．镁电解生产工艺学．长沙：中南大学出版社，2006.

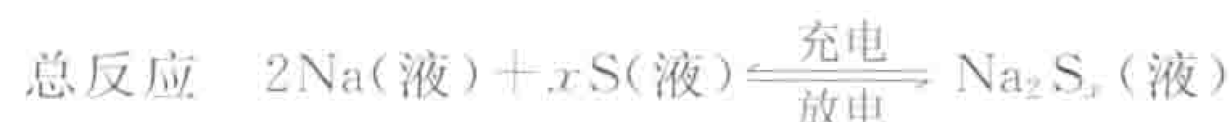
N

na-liu xudianchi

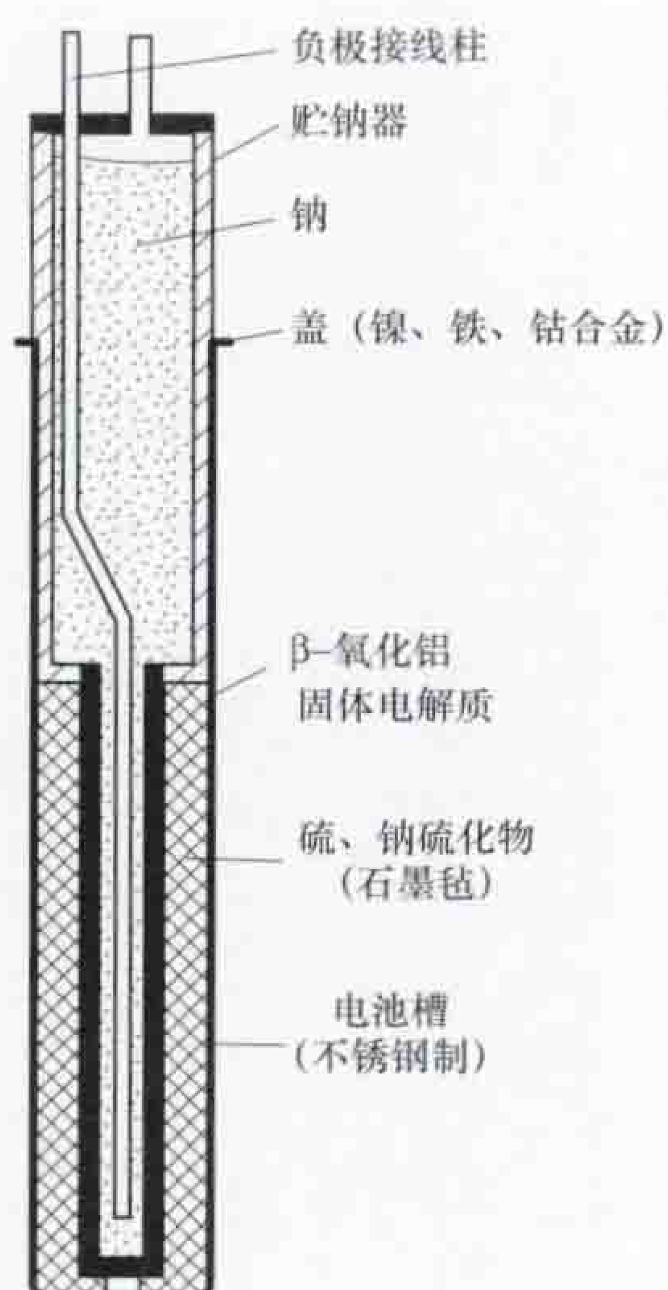
钠-硫蓄电池 (sodium-sulfur battery) 一种使用固体电解质的高能蓄电池。其负极活性物质为熔融钠，正极活性物质为熔融硫及多硫化钠（Na_2S_x），固体电解质为β-氧化铝。β-氧化铝是 Al_2O_3 和 Na_2O 的化合物，对钠离子表现出高导电性，但硫却不能通过。钠-硫蓄电池的工作温度为250～350℃，其充、放电反应式如下


正极 $2Na^+ + xS + 2e \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} Na_2S_x$


负极 $2Na \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} 2Na^+ + 2e$


总反应 $2Na(液) + xS(液) \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} Na_2S_x(液)$

钠-硫蓄电池的结构示意图如图所示。负极金属钠保持在贮钠器内。正极活性物质硫是非导体，需将其保持在多孔质碳或石墨制的集流体中。放电开始后，当有少量 Na_2S_5 生成时，其电导率就迅速升高。管状的β-氧化铝固体电解质，把管内的钠和管状的硫分隔开，共同分装在不锈钢电池槽中。多个单电池并联时可共用一个贮钠器。



钠-硫蓄电池结构示意图

由于使用固体电解质，钠-硫蓄电池的电流效率几乎为100%，单体电池开路电压为1.6～2.1V；理论质量比能量可达760W·h/kg，实际值已达390W·h/kg；放电深度为100%的情况下，充、放电循环数超过2500次。

钠-硫蓄电池曾在电动汽车上有应用，但其安全性在移动应用场合下表现不佳，而在电站储能、UPS（不间断电源）等固定应用场合已实现商品化。

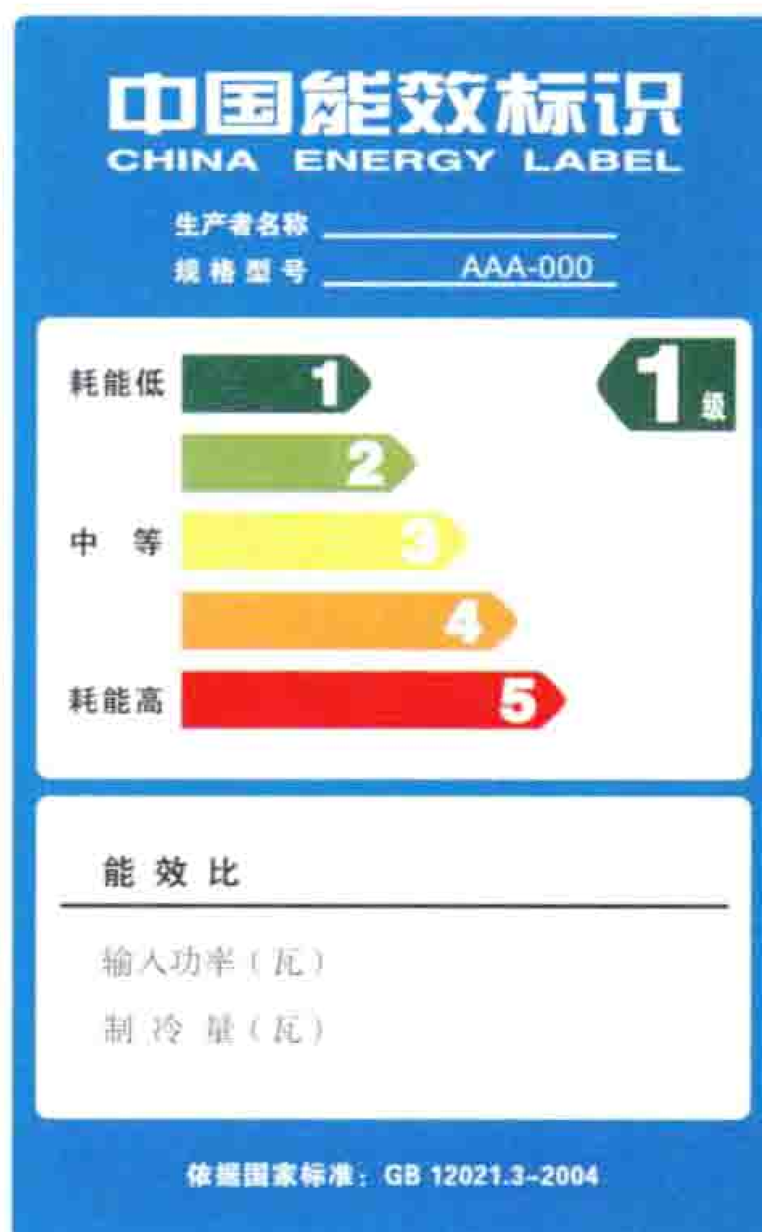
nengxiao biaoshi

能效标识 (energy efficiency labeling) 表示产品能源效率等级等性能指标的一种信息标签。一般附在耗能产品或其最小包装物上，为用户和消费者的购买决策提供必要的信息，引导和帮助消费者选择高能效节能产品。

中国能效标识 中国于2005年3月1日正式实施能效标识制度。对节能潜力大、使用面广的用能产品实行统一的能效标识，制定、公布并定期更新《中华人民共和国实行能源效率标识的产品目录》，确定统一适用的产品能效标准、实施规则、能源效率标识式样和规格。列入强制性能效标识产品目录的有家用电冰箱、房间空气调节器、电动洗衣机、单元式空调机、自镇流荧光灯、高压钠灯、中小型三相异步电动机、冷水机组、家用燃气快速热水器和燃气采暖热水炉。这些产品在中国进口和销售时必须贴上“中国能效标识”标签。

中国能效标识内容包括：①生产者名称或者简称；②产品规格型号；③能源效率等级；④能源消耗量指标；⑤其他重要的指标，如容积、输入功率等；⑥依据的能源效率国家标准编号。

如图所示，中国能效标识以蓝白为背景主色调，依据每种电器的能效水平分为1～5个等级：1级用深绿色，表示产品达到国际先进水平，最节电，属于环保产品，位于标识最上端，色块长度最短；5级用红色，表示产品耗能高，是市场准入指标，低于该等级要求的产品不允许生产和销售，位于标识最下端，色块长度最长；2～4级的颜色、位置及色块长度介于1级和5级之间，2级表示产品比较节电，3级表示能源效率为市场的平均水平，4级表示能源效率低于市场平均水平。



中国能效标识

美国能效标识 美国的能效标识制度主要表现为由美国环保署（EPA）和美国能源部（DOE）联合推动“能源之星”项目。获得“能源之星”标识的产品的能源效率一般都超过该类产品相应的最低能源效率标准。“能源之星”于1992年由美国环保署启动，目的是为了降低能源消耗及减少发电厂排放的温室效应气体。此项目并不具强迫性，自发配合此项目的厂商，可以在其合格产品上贴上“能源之星”的标签。最早配合此项目的产品主要是电脑等，之后逐渐延伸到电机、办公设备、照明、家用电器等，后来还扩展到建筑领域。

nengxiao dianchang

能效电厂 (efficiency power plant) 通过实施节电措施和节能项目，获得需方节约的电力资源而减少的电力消耗需求，是一种虚拟电厂。国际能源界将实施电力需求侧管理，开发、调度需方资源所形成的能力称为能效电厂，将减少的需求视同虚拟电厂提供的电力电量。能效电厂虽是虚拟电厂，但它形成的规模化节电能力，减少的用户电力消耗需求，可以达到与新建或扩建电厂相同的目的。与建设一个常规电厂相比，能效电厂具有建设周期短、运营成本低、响应速度快、零排放、零污染等优势，是实现节能减排的一种

有效途径。

主要应用 实施能效电厂的领域是能效管理类和负荷管理类的需求侧管理项目，包括电气照明、电动机、家用电器、变压器、蓄能移峰设备等，通过技术改造或设备更新来提高设备的用电效率，减少高峰时段用电需求，达到节能减排的目的。在中国，建设能效电厂的途径和潜力主要在节能灯具、节能家电、节能变压器和节能电动机等方面，需要政府、电网企业、电力用户、能源服务公司、设备生产商及相关中介机构等各参与主体共同推进。

能效电厂发电能力包括：①调峰能力。能效电厂可实时调度的调峰能力统称为需方调峰资源，主要包括：实施电力负荷控制、错峰、避峰、调整生产工艺等有序用电项目转移的电力负荷；推广电蓄冷、蓄热技术和蓄电池技术，实施峰谷分时电价、尖峰电价和可中断电价激励用户改变用电方式项目转移的高峰负荷；采用太阳能、风能、地热、沼气、天然气等用能项目替代的电力供应能力。②发电能力。能效电厂的发电量是需方节约的电量，包括实施高效照明器具、高效节能家用电器、高效电动机与调速装置、热泵技术、变配电节电技术、余压余热利用、建筑节能等项目节约的电力电量。

推广与建设 能效电厂的推广与建设涉及各级政府、电网企业和终端用户等诸多方面，需要相应的政策支持和运作机制。①需要制定相应的法律法规以及融资、税收、产业政策和激励机制等方面的支持政策。②需要将能效电厂建设纳入能源规划和电力规划，将其作为有效资源和常规电厂统一安排，真正实现综合资源能源战略规划。③需要加快对用能用电产品能效标准的认证工作，促进节能节电项目的实施推广。④需要建立需求侧响应机制。以价格信号或激励机制引导用户改变固有的用电方式，激励用户积极参与能效电厂建设，实施节能项目、购买节能设备或进行节能更新改造。

发展与展望 截至2010年底，能效电厂已经在美国、加拿大、法国、德国、韩国等30多个国家和地区得到了推广应用并取得了很好的效果。中国的能效电厂建设总体还处于探索和试点阶段，相关配套政策、组织模式、运作方式、技术措施、激励机制等正逐步完善。2005年以来，中国在江苏、广东、上海等省市开展了能效电厂建设，积累了一定的经验，形成了一定规模。江苏和广东能效电厂的成本是新建电厂成本的1/3～1/2，预计到2020年，中国的能效电厂可占发电总装机容量的8%，对解决电力短缺、能源可持续利用、应对气候变化、降低企业成本、提高国际竞争力等，具有深远的意义。

nihongdeng

霓虹灯

（neon tubing） 一种借助氖、氦、汞、氩或氖氩混合气体等的正柱辉光放电而发光的电光源，又称气体辉光放电灯。霓虹灯由直的或弯成任何形状的圆管组成，两端各有一电极室，电极室中各有一个冷电极。按填充气体的不同，霓虹灯可分为充氖气、充氦气、充氖氩汞气的霓虹灯和正柱辉光放电光致发光霓虹灯4种。按发光区域，霓虹灯可分为负辉气体发光灯和正柱气体放电灯两类。辉光色品与总强度取决于充填气体的种类、气体压力、放电形式和放电管的几何参量。这两类辉光放电灯的充气种类和辉光放电的色品关系见表。

充气种类和辉光放电的色品关系

气体种类	Ar	CO_2	H	He
负辉光色品 正柱区色品	蓝 紫红	蓝白 白	浅蓝 红	浅蓝绿 黄红
气体种类	**Hg**	**N_2**	**Na**	**Ne**
负辉光色品 正柱区色品	蓝绿 蓝绿	蓝 黄	黄绿 黄	红橙 红黄

霓虹灯和其他气体放电灯一样，需要使用专门的电气附件，即变压器来启动辉光放电和稳定正常的辉光放电。由于霓虹灯色品丰富多彩并可做成各种字符或图案（见图），所以在装饰照明、商业广告和光信号照明等方面得到广泛应用。



霓虹灯

充氖气的霓虹灯 具有橙红色的色品，灯管区按使用要求确定，在管长为2～6m时，管径在10～30mm之间。灯的发光效率由管径大小、电流密度和气体压力而定。研究表明，随着气体压力的增加和电流的减小，发光效率有显著上升的趋势。设计时，选择氖气的压力一般在2.66×10^2～6.66×10^2Pa，最高为1.33×10^3Pa，电流密度为0.02～0.05A/cm²，这时灯的发光效率平均为9.5～10.5lm/W。

充氦气的霓虹灯 色品为玫瑰黄或黄色，由无色玻璃管做的充氦气霓虹灯为玫瑰黄色。要得到纯黄色的正柱电辉，需要用带黄色的玻璃管，这种管一般只能透过氦光谱的黄色部分。在同样条件（管径、气压和电流密度）之下，充氦气的正柱电位陡度要比充氖气的高，而发光效率则低10%。

充氖氩汞气的霓虹灯 色品呈蓝色和绿色。在充氖和氩气的灯管内加入少量的液态汞时，其正柱电辉具有蓝色色品，其色调随管子温度和充入气体的压力而定。氖气或氩气中的汞的浅蓝色光辉，是由于汞的特征线加强而使这些气体的光谱线强度减小所引起的。因有氖或氩在灯管中，灯管上通电的最初瞬间比较容易促使放电的出现，这时灯管温度低，汞气的压力不大。充汞气的霓虹灯的电气和光度特性与充氖气的有所不同，主要反映在灯的正柱电位陡度及发光效率的减小上面。

当汞气压力很低时，汞气光谱线中紫色和蓝色谱线较绿色和黄色谱线强，所以正柱电辉具有明显的蓝色色品；当汞气压力增加时，正柱电辉的色品转变为绿色，因为这时汞光谱线中的绿色和黄色谱线较紫色和蓝色谱线强。

正柱辉光放电光致发光霓虹灯 这种灯是在辉光放电管内的管壁涂上一层光致发光物质，如荧光粉等。当它吸收短波辐射后，激发出微光。对于暖色调，如橙红、玫瑰色和金

色，填充氖气最佳；对于冷色调，如绿色和蓝色，则填充氖汞和氩汞混合气体为最佳。研究和使用表明，这种霓虹灯的色品和发光效率都比上述三种有显著的改善和提高。

nianyongdian zuida fuhe liyong xiaoshi

年用电最大负荷利用小时 (annual maximum load utilization hours) 用户或地区的年用电量与该用户或地区当年发生的最大负荷之比。它是将年实际用电量按最大负荷折算的等效用电小时数，用于描述用户或地区利用电力资源的状况，其值应小于 8760h（一年的总计小时数）。其计算公式为

$$T_{max}=A/P_{max}$$

式中 T_{max} 为年用电最大负荷利用小时，h；A 为年用电量，kW·h；P_{max} 为年用电负荷最大值，kW。

年用电最大负荷利用小时是一个统计量，不同行业不同班次的企业，其年用电最大负荷利用小时差别较大。年用电最大负荷利用小时受生产作息时间、科技进步、社会经济发展等多个因素影响。一般在工程设计和负荷预计时，根据年用电量，推定其年用电最大负荷，用于校核受电装置容量是否满足需要。

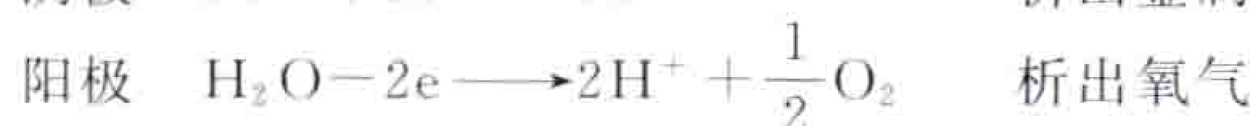
niedianjie

镍电解 (nickel electrolysis) 以硫酸镍和氯化镍水溶液为电解液，电解提取或精炼镍的冶金过程。镍电解时，由于铜、镍分离困难，致使镍电解的发展经历了较长的时间。1899 年，加拿大人 W. 布朗（W. Brown）用两组电解槽分别析出铜、镍，部分地解决了这一难题。直到 1958 年，瑞典人 N. V. 海比内特（N. V. Hybinett）发明了隔膜电解法才奠定了电解精炼镍的技术，并一直沿用至今。

镍的电解提取 用硫酸将高镍锍选择性浸出和净化除杂后得到的纯硫酸镍溶液作为电解液，以铅板为阳极，以镍始极片为阴极进行的电解，又称电积，属不溶阳极电解。镍电解提取时，在阴、阳极上进行如下电化学反应



阴极 $Ni^{2+}+2e \longrightarrow Ni$ 析出金属



阳极 $H_2O-2e \longrightarrow 2H^{+}+\frac{1}{2}O_2$ 析出氧气

电解过程中，槽电压为 3.3～3.8V，阴极电流密度为 200～250A/m²，电流效率为 95%～97%，每吨电解镍消耗直流电能 3050～3400kW·h。电解镍纯度可达 99.99%。

电解提取镍时，要用隔膜袋把阴极和阳极隔开，这种形式称为隔膜电解。纯净的硫酸镍溶液不断流入阴极隔膜袋内，通过隔膜往外渗滤，最终从电解槽的出液口排出，称为阳极液，返回浸出。采用隔膜电解是镍电解的特点。

镍的电解精炼 镍的电解精炼也采用隔膜电解。随着阳极不断溶解，电解液中的杂质离子含量会逐渐增加，需要对阳极液做净化处理，然后才能注入阴极室，这一过程称为阳极电解液净化。电解过程中，由于杂质金属的电溶解，降低了电流效率，使电解液中的镍离子贫化。为补充镍离子，须用电解或其他方法制造含镍离子浓度较高的溶液加入到电解系统中去，此过程称为造液。

电解 镍电解的阳极可用硫化镍、粗镍或镍基合金废料铸成，阴极为电镍始极片，电解液多为硫酸镍和氯化镍混合的微酸性溶液。通直流电后，阴、阳极上进行如下电化学反应



阴极 $Ni^{2+}+2e \longrightarrow Ni$



金属镍阳极 $Ni-2e \longrightarrow Ni^{2+}$



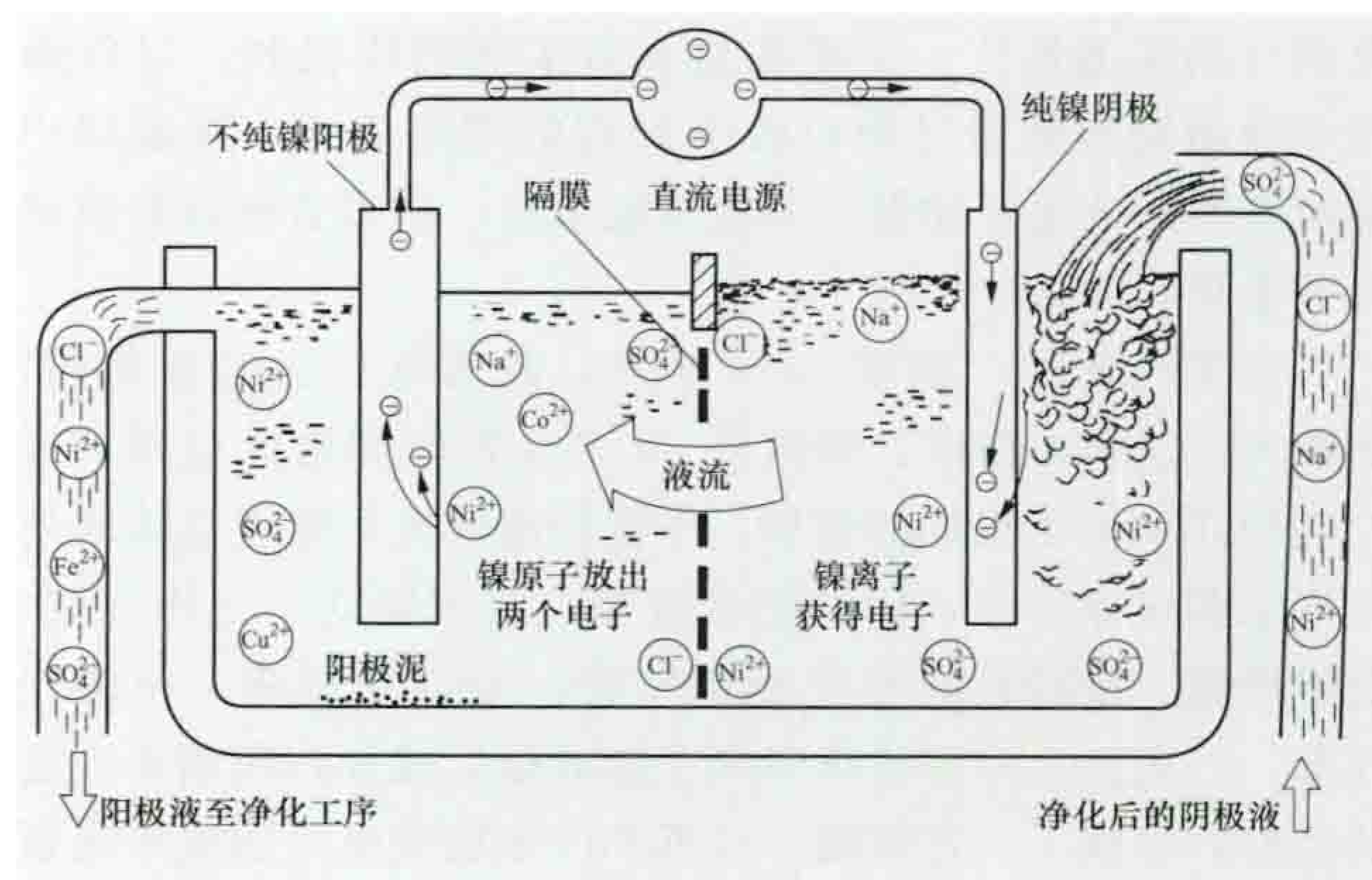
硫化镍阳极 $Ni_3S_2-6e \longrightarrow 3Ni^{2+}+2S$

电解过程中，槽电压为 2.3～4.6V，阴极电流密度为 180～250A/m²，电流效率为 95%～98%，金属镍电解为每吨电解镍消耗直流电能 2000～2300kW·h，硫化镍阳极电解为每吨电解镍消耗直流电能 3300～3500kW·h。电解镍纯度可达 99.98%。

电解过程中，阳极所含贵金属不溶解而富集于阳极泥中，可另行回收处理。

镍电解槽壳体为钢筋混凝土，内衬防腐材料，一般采用环氧树脂衬里。因其被电解液腐蚀后难以更换，存在施工及检修困难等问题，已开始采用整体乙烯基树脂混凝土电解槽替代钢筋混凝土衬玻璃钢电解槽，其特点是绝缘性好、免维护、使用寿命长。

镍的隔膜电解示意见图。为获得高纯度电解镍，必须使阴极液中铜、钴、铁的含量不超过几毫克每升，锌、铅等杂质的含量不得高于十分之几毫克每升。为防止阳极溶液的杂质金属在阴极上析出，将纯净的电解液注入阴极室，经隔膜渗入阳极室。杂质含量高的阳极电解液流出电解槽，经净化后再注入阴极室。阴极室的液面高出阳极室液面 50～100mm，使阴极液依靠静压差通过隔膜袋微孔渗入到阳极区的速度大于在电流作用下杂质离子从阳极移向阴极的速度。实际做法是将隔膜袋放在框架上，将阴极悬挂在隔膜袋内，并保持隔膜袋内的液面高于阳极室的液面。

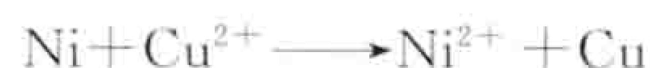


隔膜电解示意图

阳极电解液净化 简称净液。净液通常采用化学方法，主要包括除铁，除铜，除钴，除铅、锌等。

（1）除铁。通常采用中和水解法除铁。将阳极液加温到 70～80℃，鼓入空气，将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+}，并加入中和剂将 pH 值调至 3.5～4.2，使 Fe^{3+} 水解成难溶的 $Fe(OH)_3$ 而沉淀。

（2）除铜。金属镍阳极电解时，常用镍粉置换法除铜，其反应式为



$$Ni+Cu^{2+} \longrightarrow Ni^{2+}+Cu$$

在硫化镍阳极电解中，可用硫化镍除铜，其化学反应为



$$Ni_2S_3+3Cu^{2+}+Ni \longrightarrow 3CuS+3Ni^{2+}$$

除铜作业在流态化除铜槽或机械搅拌槽内进行，使固、

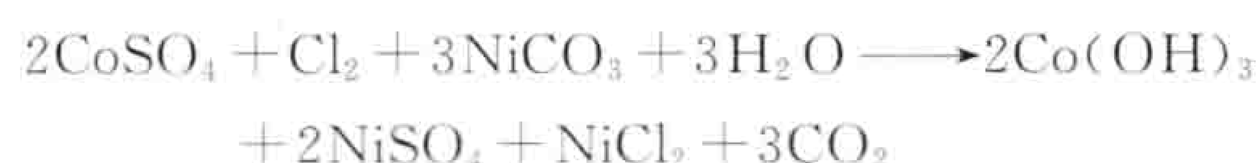
液两相充分接触，保持溶液温度为60～70℃，pH值为2～2.5。除铜后溶液经过滤，再送往除钴工序。

（3）除钴。通常采用氯气除钴法。向溶液中通氯气，氯和溶液中水的反应式为



$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow HOCl + HCl$$

HOCl是强氧化剂，迅速将Co^{2+}氧化成Co^{3+}，再用碳酸镍中和生成的HCl，Co^{3+}水解沉淀，总反应式为



$$2CoSO_4 + Cl_2 + 3NiCO_3 + 3H_2O \longrightarrow 2Co(OH)_3 + 2NiSO_4 + NiCl_2 + 3CO_2$$

溶液中的镍离子也可按上式氧化水解，因此，钴渣中含镍较高，在处理钴渣回收钴时，将镍返回到流程中去。

（4）除铅、锌。除钴后将溶液的pH值调高到5.5～5.8，通空气搅拌，使锌和铜水解成氢氧化物而沉淀。同时，将有大量的Ni^{2+}被氧化水解成Ni（OH）$_3$，能吸附Pb^{2+}共同沉淀。还可以采用阴离子交换树脂将微量铅、锌交换除去。

造液　目的是为电解液补充镍离子。在硫化镍阳极中，绝大部分金属都以硫化物的形态存在，如NiS_2、Cu_2S、CoS、PbS、ZnS、FeS等，也有少量金属镍。由于金属成分优先放电溶解，从而提高了阳极的实际电流密度，发生下列不利的反应



$$Ni_3S_2 + 8H_2O - 18e \longrightarrow 3Ni^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+$$

该反应使阳极的电流效率大为降低，使电解液中的镍离子贫化。

一般采用酸性造液电解以获得富镍溶液来补充电解液中的镍。电解液为部分阳极液以及各种渣的洗水或其他车间排出的含镍溶液，调酸至50～55g/L，注入无隔膜的常规电解槽中电解。阳极可用硫化镍阳极、镍合金阳极或来自生产槽的较完整的镍残极，阴极为铜片。氢离子和镍离子相比，其在阴极上接受电子而析出的极化作用较低。利用这一电化学特性，创造氢离子在阴极上发生电化学反应的条件，使阴极析出氢而不析出镍，从而提高电解液中镍离子的浓度。

参考书目

彭容秋．镍冶金．长沙：中南大学出版社，2005.

nongcun biandianzhan

农村变电站　（rural substation）　农村电力网中用于实现变换电压等级（主要是降低电压等级）、汇集与分配电能、调整电压、对设备与出线的保护控制等功能的电力设施。农村变电站由变压器、不同电压等级的配电装置等一次电气设备和控制、继电保护、测量、信号、通信等二次电气设备以及必要的辅助设施构成，是农村电力网的重要环节。中国农村变电站主要包括110/35/10kV、110/10kV和66/10kV、35/10kV等4种变压级的降压变电站，个别地区采用110/20kV、35/0.4kV变压级的降压变电站。

农村变电站（见图1）主要包括农村常规变电站、农村小型化变电站、农村无人值班变电站和农村智能变电站，其中智能变电站技术是发展方向。

农村常规变电站　按照中国电力行业通用技术标准设计建设的农村变电站，包括110kV农村变电站和主变压器容量较大的35、66kV农村变电站。常规变电站主变压器保护采用SF_6或真空断路器，主变压器10kV侧及出线采用真空断路器或成套开关柜。



图1　中国农村标准变电站（安徽临泉县供电局　提供）

农村小型化变电站　按照中国农村小型化变电站设计规程设计建设的小容量降压变电站。这种变电站的接线简单，采用性能先进的专用设备，户外敞开式布置，单台主变压器容量为6300kV·A及以下，变压级为35/10kV或66/10kV。高压侧进线一般在2回及以下，多采用桥形接线、线路变压器组接线或线路分支（T接）接线。T接在线路中的分支变电站或终端变电站，高压侧采用高压熔断器和负荷隔离开关配合对主变压器进行保护和操作。10kV出线少于6回时一般用单母线，出线多于6回且有2台主变压器时一般用分段单母线或简易分段单母线（省去母联断路器，仅用隔离开关分段）。10kV侧采用真空断路器、真空自动重合器或SF_6断路器、SF_6自动重合器作为开断设备，而不采用油断路器或油自动重合器。变电站的配电装置为户外敞开式，一般用半高型布置。

农村小型化变电站的继电保护比常规变电站简单。主变压器高压侧采用熔断器作为主保护，过负荷保护、瓦斯保护、温升保护都动作于信号。主变压器10kV侧采用断路器时，设过电流保护带时限动作于跳闸。10kV出线采用自动重合器保护。10kV长线路干线、分支线上通常装设自动分段器与自动重合器配合，可缩短故障寻找时间，缩小停电范围，提高供电可靠性。农村小型化变电站一般设有远动装置和可靠的通信设施，可以实现调度自动化，也可以实现无人值班。

农村无人值班变电站　农村电力网中具有远方监控功能并可以远方操作而不设专人值班的变电站，又分有人值守和无人值守两类。值守人员只负守卫责任而不承担值班员的职责。与一般变电站的设备相比，无人值班变电站的一次设备、二次设备和远动、通信装置等性能较先进、功能完备、运行可靠。农村无人值班变电站建设的前提是实现调度自动化，并应配合必要的安全运行、维护技术措施。

农村智能变电站　智能变电站是采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，并可根据需要支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级功能的变电站。35kV智能变电站一体化信息平台主要融合监控、在线监测、辅助系统等站内各系统功能，能够提供完整的变电站数据信息，便于配合实现智

能调度和远程系统维护。35kV智能变电站与常规变电站的对比见表。

35kV智能变电站与常规变电站对比

项目	35kV常规变电站	35kV集成式智能变电站
系统构成	采用"两层一网"结构；站控层监控、"五防"[防止带负荷分、合隔离开关，防止误分、合断路器，防止带电挂(合)接地线(接地开关)，防止误入带电间隔，防止带接地线(接地开关)合断路器(隔离开关)]、远动独立配置；间隔层保护分散分布式布置，间隔保护测控、备自投、选线装置等独立配置；无过程层网络和设备	采用"三层两网"结构，增加过程层，提高了基础数据的信息共享水平；站控层增加智能告警、故障分析、设备管理、与其他系统协同互动等功能并与"五防"、监控集成化实施；间隔层配置接地智能化装置，在过程层集成实现间隔测控保护与站域保护、站域控制，提高软件功能集成度
功能构成	面向间隔的保护、远动功能；备自投、接地选线等简单的站域控制功能，功能扩展复杂；与辅助系统等相互独立；变电站孤立存在，与相邻变电站及配电网无联系	面向系统的站域优化保护、控制等功能，且功能扩展简单便捷；与辅助系统、状态监测系统进行信息融合并协同互动；可实现与相邻变电站、配电网、输电网的无缝信息交互，为电网一体化控制提供基础
施工维护	采用大量电缆，施工周期长；通信规约不统一，系统联调周期长	采用少量光缆，施工周期短；遵循DL/T 860《变电站通信网络和系统》系列标准，设备互操作性好，系统联调快
综合造价	较低	略高

发展与现状　中国于20世纪50年代末随着小水电站的发展，开始建设35/10kV农村变电站。60年代初期及以后一段时间，随着大电网向农村的延伸，35(66)kV农村变电站加快发展，建设了一批主接线简单、设备简陋、技术水平低的农村变电站，主变压器保护采用老式熔断器、10kV侧及出线采用柱上多油断路器，称为简易变电站。80年代开始，对简易变电站进行改造，逐步淘汰。之后，农村电力网形成了35(66)kV的骨干网架，35(66)kV变电站成为该网架的枢纽，110kV农村变电站开始发展。1983年河南省建成了设备先进的农村小型化变电站，以后逐步在各地推广，淘汰简易变电站，并部分取代常规变电站。图2所示为1983年建成的中国第一座110kV小型化变电站。80年代中期，随着县级电网调度自动化的发展，农村变电站自动化技术和自动化水平不断提高。90年代开始建设无人值班变电站。1994年12月首先在河北省三河县实现全县35kV农村变电站无人值班，继而1995年末河北省石家庄全市各县(县级市)110、35kV农村变电站实现无人值班。在中国其他省(市、自治区)也开始建设农村无人值班变电站。进入21世纪，在数字化变电站技术不断成熟的基础上，出现了农村智能变电站。2009年后，随着智能电网建设的开展，智能变电站开始发展。



图2　中国第一座110kV小型化变电站
(1983年建成，位于河南省)

nongcun dianliwang

农村电力网　(rural electric power networks)　为农村区域供电的配电网。在中国，农村电力网指主要为县(县级市、区、旗)级行政区域内的县城、乡(镇)村或农场及林、牧区用户供电的110kV(个别县域有220kV)及以下各级配电网，简称农网。农网由各级配电线路、变电站和配电台区构成，通常分为农村高压配电网、农村中压配电网和农村低压配电网。农村高压配电网是指农网内标称电压为35、66kV及110(220)kV的配电网；农村中压配电网是指农网内标称电压为6、10kV及20kV的配电网；农村低压配电网是指农网内标称电压为220、400V的配电网。图示为400V供电线路。发达国家的农村电力网几乎全部由大电力系统或大、中型发电厂供电，不少发展中国家的农村电力网主要由中、小型发电厂或小型发电装置供电。中国大部分农网(约占4/5)由大电力系统供电，少部分农网由中、小型发电厂(主要是中、小型水电站、小火电、风电、光伏发电)供电并与大电力系统联网运行，少数农网由小型发电厂供电形成独立运行的小型电力系统。农网由于所带负荷相对较小且比较分散，与输电网、城市电力网有不同的技术经济规律。



西藏那曲400V供电线路
(贺焕峰　摄)

发展与现状　中国农网的发展于20世纪50年代起步，主要是城市电力网向农村延伸和配合小水电站工程建设10kV及以下配电网。60年代以后有较大规模的发展，大致分为四个阶段。

1961～1980年为快速发展阶段。20世纪60年代初，35kV电网开始深入县辖区的负荷中心，主要为农田排灌、农副产品加工和农村生活照明供电。70年代末中国开始改革开放，由于县办工业、乡（镇）工业和村办工业逐步发展，农业生产快速发展，农民生活水平不断提高，农村用电的需求大大增加，促使农网进一步发展。到80年代初，多数地区已形成35（66）kV电力网架。1962～1980年间，35kV线路由1.01万km增到11.57万km，3～10kV线路由6.47万km增到104.65万km，400V低压线路增到213.5万km。

1980～1990年为发展和提高阶段。这一时期，开始建设110kV电网，20世纪80年代中后期已形成110kV农网网架。在农网发展的同时，注重农网的技术改造和技术进步，注重按照农网的技术经济规律建设和改造电网，逐步提高农网设备质量水平，调整农网布局和输变配电比例，使之趋于合理，努力降低线损、减少事故并提高农网的经济效益和社会效益。对农网中的农村小型化变电站、中低压配电网布局、无功补偿、电压调整、降损节能、触电保护等问题进行了研究，并在农网建设和改造中采取了相应的措施，取得了成果。在农网装备方面，已明确采用性能先进、功能完备、运行可靠、耗能少、自动化水平高的标准化产品。

1990～2010年为农网标准化、完善化阶段。20世纪90年代农网规模继续扩大，中国农网高低压线路总长度步入世界前列，中高压线路长度与美国接近。农网的建设、改造注重规范化、标准化和实现运行管理的自动化。1998～2001年，对农网进行建设与改造，在技术上完善化并接近世界先进水平，走上科学的发展轨道。中国农村电力网的发展概况见表。

中国农村电力网的发展概况

项目 \ 年份	1962	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	1999	2000	2001	2002	2010
线路长度（万km）													
110kV					6.63(1982年)	2.78	5.48	8	11.9	13.04	14.60	16.27	22.67
35（66）kV	1.01	1.82	3.84	8.02	11.57	15.50	21.12	26	29.85	31.27	33.87	38.16	33.07
3～10kV	6.47	14.13	35.29	71.07	104.65	149.97	187.42	224	263.03	274.65	292.64	306.2	330.01
400V				134.66	213.5	333.77	436.36	556	664.47	715.73	775.09	816.38	835.87
变电站主变压器容量（万kV·A）													
110kV					1347.5	2179.65	5118	9456	16 287	17 693.5	20 769.6	24 381	57 423
35（66）kV	164.62	293.49	558.15	1480.64	2327.97	3307.26	5466	8596	10 861.8	11 820	13 116	13 996	23 057
10（35）kV配电变压器容量（万kV·A）	284.37	601.64	1379.41	3728.72	7640.41	11 020.18	15 862	23 240	29 203.6	33 426	34 595	45 509	91 502

2010年以后为农网改造升级阶段。2010年中国开展新一轮农网改造升级，确定“统一规划、分步实施、因地制宜、适度超前”为基本工作原则，采用成熟先进的新技术、新设备、新材料、新工艺，并适度推进农网智能化建设。以省为单位实现城乡各类用电同价目标，基本建成安全可靠、节能环保、技术先进、管理规范的新型农村电网，满足农村经济社会发展和人民生活用电需求。

特点　与城市电力网相比，农网负荷有以下特点：①用户地域分散，用电负荷小，使农网负荷密度小且地域差别很大。②负荷峰谷差大，用电负荷率（平均负荷与最大负荷之比）低。③负荷季节性、时令性强，年用电最大负荷利用小时低。中国农网负荷的负荷密度小的不超过10kW/km^2，一般为10～100kW/km^2，极少超过1000kW/km^2。中国农业区用电负荷的最大负荷利用小时数约为2000h，村、乡镇工业较多的地区约为3000h。由于与城市电力网的负荷不同，使农网有以下特点：①送电距离远、送电功率小、输送电能量少，农网变电设备和线路的利用率低，造成农网的供电成本偏高、经营效益偏低。②农网延伸面广、规模大，不便于运行管理。③农网的自然功率因数低，一般为0.8左右。④农网配电方式有普通三相制（三线或四线）配电方式和农网特殊配电方式。为降低农网供电成本，在农网中采用的特殊配电方式有两线一地配电方式，一线一地配电方式和单、三相混合配电方式等。

nongcun dianliwang dianqi shebei

农村电力网电气设备　（electric equipment of rural power networks）　主要用于农村且适合电力网运行特性和运行要求的中压电气设备，又称农网装备。由于农村电力网的负荷密度小、用电季节性强，又处于系统末端或属于小型电力系统，所以农村电力网电气设备的利用率低、容量小。为提高农村电力网自身的经济效益和供电质量，要求其电气设备有较强的适应性，且多为轻型或小型化、功能完备、运行可靠、造价低廉。这些设备主要包括配电变压器、10kV断路器、10kV负荷开关、熔断器等。图1所示为变压器安装现场。



图1　变压器安装现场（凡利达　摄）

配电变压器　20世纪50年代，配电变压器采用热扎硅钢片生产，能耗较高。70年代开始采用晶粒取向冷扎硅钢片生产配电变压器，随后日本通过技术改进，研究了高性能晶粒取向硅钢片，采用高性能晶粒取向硅钢片的配电变压器尺寸、质量和空载损耗均有较大幅度的减少。80年代初美国研制出非晶合金材料，用于生产单相和三相配电变压器，节能效果显著。中国于90年代开始采用非晶合金材料试制配电变压器。21世纪，又根据农村负荷特点，研制并开始推广应用新型节能配电变压器，主要包括S13及以上型号配电变压器、非晶合金铁芯配电变压器、调容配电变压器。

S13及以上型号配电变压器通过采用高导磁、低损耗的优质高性能硅钢片，经过优化设计，降低空载损耗和负载损耗。S13型配电变压器与同容量S11型配电变压器相比，空载损耗下降25%以上，噪声下降7～10dB，铜材消耗下降3%～5%。



图2　非晶合金立体卷铁芯变压器

非晶合金铁芯配电变压器（见图2）的铁芯采用非晶合金带材，空载损耗大幅降低，与S11型配电变压器相比平均降低约65%；由于非晶合金材料的特殊性，非晶铁芯不能用夹件过分压紧，铁芯振动受到的束缚较少，因此噪声相对同容量及规格的硅钢配电变压器高3～8dB。

调容配电变压器（见图3）包括有载调容配电变压器和无载调容配电变压器，有载调容配电变压器在不停电的情况下，可根据实际负荷大小通过调容开关改变高低压绕组连接方式，实现容量转换，使变压器处于较经济运行方式，有效克服了无载调容配电变压器不能自动调节变压器容量的固有缺陷。



图3　调容变压器

10kV断路器　电力系统中最重要的开关设备，担负着控制和保护的双重任务。为实现开断和关合回路（带电或不带电）功能，断路器必须具备三个组成部分：①开断部分，包括导电系统、触头系统和灭弧室；②操作和传动部分；③绝缘部分。其中开断部分中的灭弧室为核心部分。断路器按照灭弧原理，分为油断路器（其中包括多油和少油）、压缩空气断路器、六氟化硫（SF_6）断路器、真空断路器、磁吹断路器和空气断路器。使用较多的是真空断路器和SF_6断路器。

真空断路器的灭弧介质及灭弧后触头间隙的绝缘介质都是高真空。中压真空断路器容量可做到很大，完全能满足用户要求。1926年美国伦逊在实验室完成了真空断路器的雏形，20世纪50年代中期真空断路器产品在美国问世，其开断电流为4kA，工作电压为20kV。70年代末期，随着新型触头材料研制成功和灭弧理论的发展，真空断路器技术产生了巨大飞跃，开断电流提高到40kA。21世纪初，真空断路器可实现额定电压168kV、额定电流4000A、额定开断电流达100kA的水平。真空断路器在中压领域内占65%，特别在日本、德国和美国等国家，真空断路器备受青睐，在日本，真空断路器占日本市场的80%。中国在20世纪60年代初开始研究真空断路器，70年代进入工业生产阶段，1993年开始大量使用。1997年德国首先研制了配永磁机构的真空断路器，其采用了双线圈双稳态结构的永磁机构。中国企业研制生产的永磁机构真空断路器已进入市场，并积累了一定的运行经验。永磁机构包括双线圈双稳态和单线圈单稳态永磁机构两种。2000年，中压真空断路器产量占全部市场的87.36%，2001年以来该比率均大于90%。

SF_6断路器利用SF_6作为灭弧和绝缘介质，具有灭弧能力强、介质强度高、介质恢复速度特别快、开断次数多、检修周期长等优点，同时在密封技术、干燥、检验和测试等方面具有一些特殊要求。20世纪50年代第一台SF_6断路器问世，原理与长充气空气断路器相同，为双压式结构（随着气流从高压区流向低压区而熄弧）。60年代后，单压式（取消了压缩机，在开断过程中压缩气体）SF_6断路器进入发展时期。80年代后期至90年代，研究并提出了自能吹弧原理，利用电弧本身能量熄灭电弧，不需要操动机构提供很大的能量，大大简化了结构。21世纪以来，为配合农村小型化变电站的发展建设，中国引进吸收并开发了适合农网特点的户外SF_6自动重合器、真空自动重合器和自动分段器，这些设备性能先进、功能完备、自动化程度高，有效提高了农网运行的可靠性。

智能化是高压开关设备的重要发展趋势。开关设备的智能化包括两层含义：一是对开关设备外围进行控制和监测，即运用传感器采集设备运行数据，用计算机分析处理采集数据，得出监测结果，提供动作信号或信息；二是智能操作型断路器，其本身具有智能化操作功能。

10kV负荷开关　具有简单灭弧室装置的一种开关电器，可关合和开断负荷电流和过载电流，亦可用作关合和开断空载长线、空载变压器和电容器组用。负荷开关按不同灭弧介质可分为矿物油、压缩空气、有机材料产气、SF_6气体和真空负荷开关5种。其中真空负荷开关的触头被封入真空灭弧室。中压负荷开关在中压电网中得到了大量应用。负荷开关和限流熔断器串联组合可代替断路器，负荷开关承担关合和开断各种负荷电流，熔断器承担开断较大过载和短路电流。负荷开关在分闸位置时有明显可见的间隙，无需串联隔离开关；负荷开关不要求开断短路电流，但要求能够关合短路电流，并承受短路电流动稳定性和热稳定性。

参考书目

林莘．现代高压电器技术．北京：机械工业出版社，2002.

nongcun dianliwang dianya tiaozheng

农村电力网电压调整　（voltage regulation in rural electric power networks）　由于负荷变化、电力系统运行方式变化或两者同时变化引起用户端和电网枢纽点电压变化时，将电压调节维持在规定范围的技术。电力系统正常运行时，由于负荷变化、参数变化引起系统各点电压较缓慢地变化。这时供电电压（用户处实测电压）与系统额定电压的差

称为电压偏差，一般用其占额定电压的百分数表示。中国国家标准规定：①35kV及以上供电电压正、负偏差的绝对值之和不超过额定电压的10%，如供电电压上下偏差同号（均为正或负）时，按较大的偏差绝对值作为衡量依据；②20kV及以下三相供电电压允许偏差为额定电压的±7%；③220V单相供电电压允许偏差为额定电压的+7%、−10%。当电网内具有冲击性快速变动功率的负荷（如轧钢机、炼钢电弧炉等）时，会引起供电点电压的快速变化，为把这种冲击负荷引起的电压快速变化控制在合理范围内，各国规定了电压波动和闪变的允许值。

调压措施　主要有调节发电机励磁电流调压、改变无功潮流调压、有载和无载改变变压器分接头调压、调压器调压和改变电网参数调压。此外，还可采用调容调压一体化技术。

（1）调节发电机励磁电流调压。通过调节发电机励磁电流可以改变发电机机端电压。该方法简便易行，但调压范围受限制。在小型发电厂供电的农村电力网内，该调压方法可以起到明显作用。

（2）改变无功潮流调压。改变无功潮流的方法主要是用并联电容器和静止无功补偿装置进行无功补偿。并联电容器和静止无功补偿装置无功补偿可减少电力网通过的无功功率，降低线路、变压器的电压损耗以起调压作用。同时，并联电容器和静止无功补偿装置无功补偿使系统有足够的无功电源，保证在电压较高时供给用户所需要的较大量的无功功率，避免电力系统发生电压崩溃。同步补偿机（又称调相机）也是无功电源，可以改变无功潮流。但因其造价高，运行维护不便，在农村电力网中应用很少。

（3）有载或无载改变变压器分接头调压。前者是在变压器带负载的情况下手动或自动调压，电压高时把电压调低，反之调高。它可以缩小供电电压的偏差范围。后者是在变压器停运或不带负载的情况下手动改变分节头调压，它不能缩小供电电压的偏差范围，只能改变电压水平，同时影响供电可靠性。

（4）调压器调压。农网调压器调压包括10kV馈线自动调压器调压、数字低电压补偿装置调压和户用调压器调压3种方式。10kV馈线自动调压器可在一定的范围内对输出电压进行自动调节，当输出电压值的电压偏差大于允许范围，并延续一定时间段之后，通过控制三相有载分接开关调节输出电压，以调整10kV馈线自动调压器后端电压。数字低电压补偿装置可以直接串联在低压线路中，通过自动跟踪电网电压调节电压幅度。户用调压器是针对用户出现电压偏差超限情况进行电压调整，以提高用户电压质量。图示为宁夏盐池SVR馈线自动调压器。



宁夏盐池SVR馈线自动调压器

（5）改变电网参数调压。根据负荷大小改变并联运行变压器的台数，从而改变农网的参数，起到调压作用。负荷小电压升高时，减少并联运行的变压器台数，加大了变压器的并联阻抗及电压损耗，使电压降低。负荷大电压降低时，增加并联运行的变压器台数，减小变压器的并联阻抗及电压损耗，使电压升高。这一方法在农村变电站内使用既有调压效果，又有降低电能损耗的效益。但对只有一台变压器的农村变电站和大多数农村配电台区，这一方法不能使用。在中压配电线路上串联电容器可以减少线路总电抗起调压作用。感性无功功率在容性电抗上产生电压升高，升高的电压值为$\Delta U_C = QX_C/U$。式中Q为通过串联电容器的无功功率；X_C为串联电容器的容抗；U为线路额定电压。这一方法的调压作用随负荷的变化而立即变化，无需操作或控制。由于串联电容器与其后电动机群易发生串联谐振问题，该方法已很少采用。

（6）调容调压一体化技术。根据负荷大小及电压水平，通过调整配电变压器绕组结构及分接头位置，同时满足调整配电变压器容量和保障电压质量要求，其中调容功能通过高压侧绕组的星-三角转换和低压侧绕组的串、并联转换实现。具有无载调压功能的有载调容配电变压器技术已基本成熟，存在短时停电的自动调容调压配电变压器技术处于试运行和技术完善阶段，可实现有载调容调压的配电变压器尚处于研究阶段。调容调压一体化配电变压器适用于农村周期特征明显的负荷及峰谷负荷时电压波动较大的区域，是配电变压器发展的新方向。

综合调压方案　解决农村电力网供电电压质量的综合措施，目的是采取合理的调压方式和合理限制配电线路的电压损耗，在满足电压质量的前提下使农网结构整体经济合理。中国农村电力网合理的综合调压方案有：①在110/35kV（220/66kV）变电站利用有载调压变压器实施逆调压方式，其低压侧母线电压偏差在最大负荷时为+5%或+7%，最小负荷时为0。②35/10kV或66/10kV变电站采用有载调压变压器调压，其调压范围为±5%。③调整农村电力网网架结构，控制各级配电线路的供电半径，适当加大导线截面，把各级线路的电压损耗限制到合理范围之内。中国农村电力网110、66kV线路电压损耗合理范围为4.5%～7%，35kV线路为2%～4%，10kV线路为2%～6%，0.4kV线路小于7%。调整网架结构、限制电压损耗是保证电压质量的前提条件，也是使农村电力网达到技术、经济合理的关键措施。④采用电压质量软件系统优化调压，该系统将计算机、通信、信息化、自动控制等先进技术应用于农村电力网的电压采集、监控、调整、管理等方面，可以优化多种调压措施的协调配合，为农村电力网运行控制提供辅助决策，提高电压质量。

除综合调压方案外，农村电力网还可以采取的辅助调压方案有：①10/0.4kV配电变压器采用无载调压。②采用无功补偿装置调压，无功补偿装置容量按农村电力网无功补偿要求来选择，无功补偿装置在补偿无功的同时也起调压作用。

另外，特殊情况下使用的调压措施有：①中压线路采用10kV馈线自动调压器调压。②采用数字低电压补偿装置直接串联于低压线路调压。③在个别用户处安装调压器。

电压质量管理　通过管理手段提高农村电力网的电压质

量。由于各种原因，长期以来中国农村电力网的电压质量管理相对落后，随着电力用户对电压质量要求的不断提高，电压质量管理问题逐步得到重视。“十一五”以来中国农村电力网大力推进负荷三相不平衡管理、错峰用电管理、配电变压器分接头管理和电压无功补偿装置运维管理等工作。通过并建立相应的电压质量管理细则，细化监测及管理方法等，不断提高电压质量管理的操作性和适用性，从而提升农村电力网电压质量管理效率及电压质量。

nongcun dianliwang wugong buchang

农村电力网无功补偿 (reactive power compensation in rural electric power networks)　就近设置无功电源供给消耗无功功率的用电负荷和电网设备等，以减少农村电力网输送的无功功率的技术。农村电力网的无功电源主要是并联电容器和静止补偿装置。中国农村电力网内有大量小容量电动机和配电变压器，需要大量滞相励磁无功功率，所以农村电力网的自然功率因数（见用电功率因数）较低。滞相无功功率在配电网内流动，使功率损耗和电压损耗增加，同时占用电源和电网容量。利用并联电容器或静止补偿装置就近进行补偿后，上述情况可以改善，既有明显的经济效益，又能改善电压质量。

中国农村电力网建设初期对无功补偿不够重视，致使农村电力网功率因数长时期偏低。20 世纪 80 年代初，先后研究了无功补偿方式、经济功率因数等课题，并普遍采取了补偿措施，使农村电力网功率因数明显改善，但大部分农村电力网功率因数仍然偏低。由于无功投切装置不够完善，个别地方农村电力网出现过补偿现象。21 世纪初，采用了现代电力电子技术的动态无功补偿装置开始在农村电力网中应用，可以快速动态补偿农村电力网中频繁波动的无功功率，抑制电网闪变和谐波，降低网络损耗，提高农村电力网的功率因数，改善供电质量。农村电力网将进一步调整无功补偿装置布局，实现分层分区、就地补偿；采用经济可靠的无功自动投切装置，提高电容器投运率并防止无功传递；采用性能好、寿命长的并联电容器和静止补偿装置，提高补偿效率；适当增加补偿容量，使农村电力网功率因数达到 0.9 以上，以提高其经济指标。

无功补偿方式　根据无功补偿的对象和无功补偿装置的性质等采取无功补偿的应用方式。配电网无功补偿方式主要有变电站集中补偿、10kV 配电线路分散补偿、配电变压器低压侧集中补偿、低压电动机随机补偿。

变电站集中补偿是指在 110/35/10kV、110/10kV、66/10kV、35/10kV 变电站的 10kV 母线上集中进行无功补偿。10kV 配电线路分散补偿是指把一定容量的补偿装置分散安装在供电距离远、负荷重、功率因数低的 10kV 线路上，主要补偿线路上感性电抗所消耗的无功功率和配电变压器励磁无功功率损耗。配电变压器低压侧集中补偿是指在配电变压器低压母线上集中安装补偿装置进行补偿，与配电变压器同投同切。低压电动机随机补偿是指将低压补偿装置与电动机并接，通过控制、保护装置与电动机同时投切，补偿电动机的无功消耗。

无功补偿在高压配电网，中、低压配电网和低压用户端有很多典型应用模式。

高压配电网无功补偿模式包括：①动态平滑调节无功补偿模式，其补偿装置为动态无功补偿装置，适用于枢纽及相对重要的变电站。②自动投切无功补偿模式，其补偿装置为分组的并联电容器且可以分组自动投切，适用于负荷波动较大的变电站。③固定无功补偿模式，其补偿装置为容量固定的并联电容器，适用于负荷变化相对稳定的变电站。④无功补偿＋滤波模式，该模式在进行无功补偿的同时可以抑制谐波，适用于谐波污染较为严重的变电站。

中、低压配电网无功补偿模式包括：①配电变压器低压侧集中补偿＋中压线路补偿模式，该模式采用配电变压器低压侧集中无功补偿和中压线路无功补偿相结合的方式，适用于供电半径长、负荷重、功率因数低的 10kV 馈线。②配电变压器低压侧集中无功补偿模式，该模式仅在配电变压器低压侧进行集中无功补偿，适用于供电半径较短、负荷轻的 10kV 馈线。③中压线路无功补偿模式，该模式在中压线路仅进行无功补偿，适用于供电半径较长、负荷轻且较为集中的中压馈线。④无功补偿＋滤波模式，该模式在进行无功补偿的同时可以抑制谐波，适用于容易产生谐波污染的厂矿、大型企业、铁路等高压用户的专用变压器以及谐波污染较为严重的配电台区。

低压用户端无功补偿模式包括：①电动机随机补偿模式，该模式仅在电动机进行集中无功补偿，适用于较大功率的电动机。②配电室集中补偿模式，该模式仅在配电室进行集中无功补偿，当工厂、车间安装的电动机采用随机补偿方式有困难时，可选用在配电室集中补偿的模式。③随机补偿＋配电室集中补偿模式，该模式仅在配电变压器低压侧进行集中无功补偿，适用于负荷较重的配电台区，对利用率较高的大功率（大于 5kW）电动机进行随机补偿，对未进行补偿的小功率电动机在配电室集中补偿。

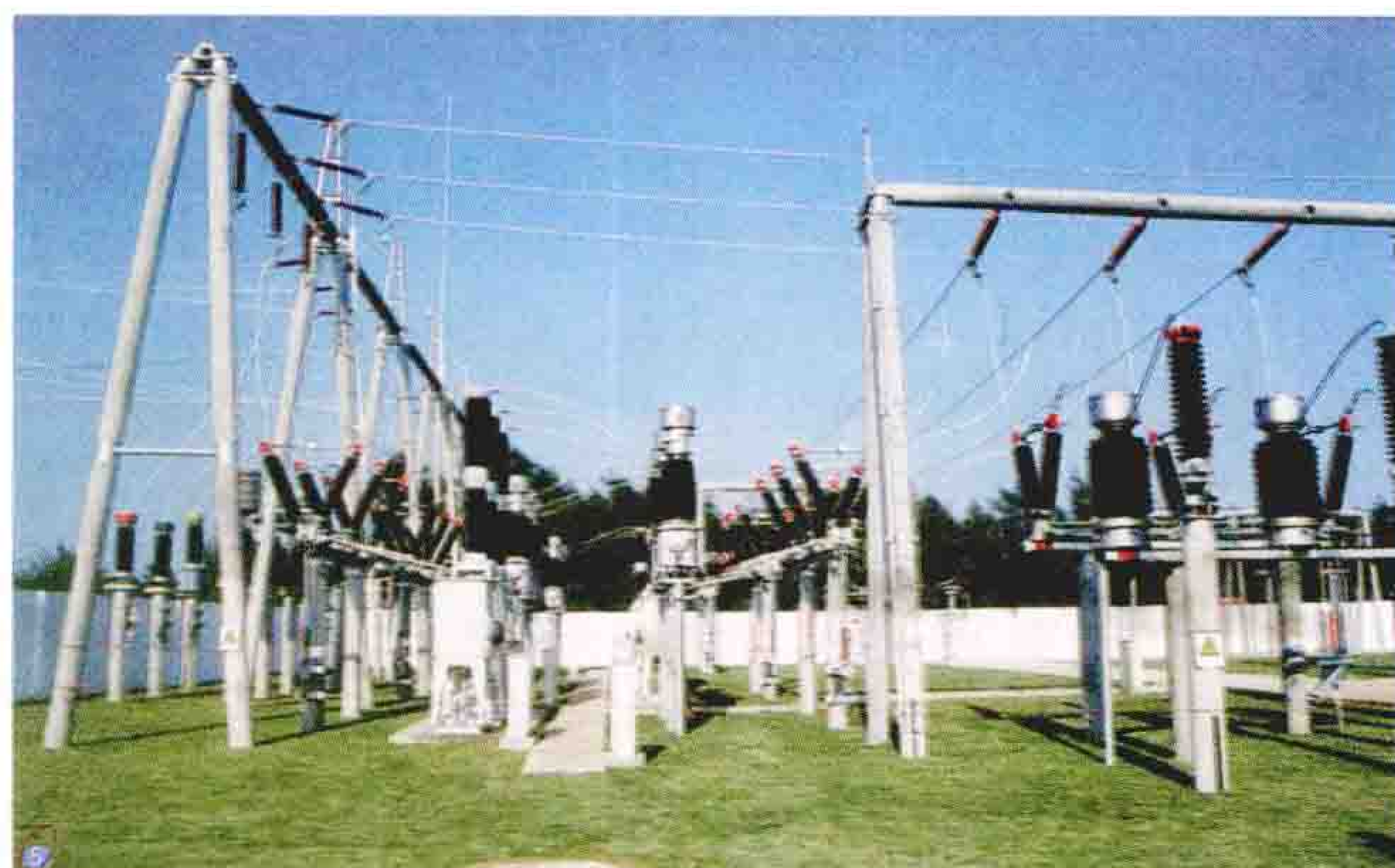
全网无功优化　根据区域电网网络结构、负荷性质、运行参数等，按照无功功率分层分区、就地平衡的基本原则，对无功补偿装置进行优化配置，实现区域电网网损等指标最优。全网无功优化是随着电网的自动化水平和通信水平的提高而提出的，在部分区域农村电网已经开展，它可以有效地实现区域电网无功分层分区、就地平衡，降低全网网损，提高电网的经济运行水平。

无功补偿容量　①变电站 10kV 侧的补偿容量略大于主变压器所消耗的无功功率，除补偿主变压器消耗的无功功率外，尚有一定的调节能力；②配电变压器低压母线上除补偿配电变压器消耗的无功外，也应有一定调节能力，以使变压器高压侧的功率因数不低于 0.9；③单独运行的异步电动机机端补偿容量约为电动机的空载无功功率，电容器随电动机一起投切；④车间、作坊的电动机群也可在车间配电盘处进行集中补偿，补偿容量 Q_C 按把功率因数提高到 0.9 来确定，即 $Q_C = P_{max}(\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1)$。$\varphi_1$ 为自然功率因数角；φ_2 为经济功率因数角，$\varphi_2 = \arccos 0.9$；P_{max} 为车间最大负荷有功功率。车间集中补偿时，一般加装电容器自动投切装置。

nongcun dianliwang zidonghua

农村电力网自动化 (automation of rural electric power networks)　综合利用计算机、远动和通信技术，实现农村电力网中变电站、配电线路、配电台区、电力用户、分

布式电源等自动运行与管理的技术，简称农网自动化。主要包括县级电网调度自动化、农网变电站（110kV及以下电压等级）自动化、农村配电网自动化、电力用户用电信息采集系统等。图示为海南110kV农村电网。



海南110kV农村电网（蔡建中 摄）

县级电网调度自动化　由县级调度中心的主站、厂站端的远动终端（remote terminal unit，RTU）和联系主站与变电站（发电厂）之间数据传输的通信信道组成县级电网调度自动化系统，对农村电力网中变电站、配电线路实现自动化运行与管理。其基本功能包括：数据采集、安全监控、功率总加、电能量总加、事件顺序记录、汉字制表打印、汉字CRT显示及操作、模拟盘显示、数据转发等。远动终端的基本功能包括：采集和发送状态量、数字量、模拟量和脉冲量，数据转发，问答式传输方式下被测量超越定值发送，程序自恢复及记录，设备自调、自检、自诊断，接收并执行遥控命令及返送校核，当地选测、显示、打印制表，通道监视，事件顺序记录等。县级电网调度自动化系统按照规模可分为大型（电网容量大于150MW）、中型（电网容量为50～150MW）、小型（电网容量小于50MW）。不同规模的县级电网调度自动化系统主站配置有一定差异，大型和中型系统配置双机系统（自动切换）或网络结构，可接入远动终端数量大于或等于16台，人机交互显示器要求不少于2台；小型系统配置单机系统或网络结构，可接入远动终端数量大于或等于8台，人机交互显示器要求1～2台；打印机、系统时钟、软件系统、不间断电源等方面的配置基本相同。

农村变电站自动化　应用自动控制技术、微机及网络通信技术，实现对变电站的监控、保护、测量、运行操作管理、信息远传及其协调。变电站自动化系统一般分为集中式和分层分布式。集中式结构的变电站自动化系统，按功能划分为保护子系统、远动子系统等，其各自独立，通过硬接点或通信联系，完成信息交换。分层分布式结构的变电站自动化系统，分为变电站层和间隔层，层与层之间相对独立，仅通过现场总线或局域网交换信息。变电站层由通信管理、当地监控等设备构成，主要完成站内及远方通信、站内智能装置通信接口、当地监控等功能。间隔层设备按站内一次设备分布式配置，110kV及以上电压等级的设备通常采用保护装置与测控装置分别独立设计，但共同组屏的方案；110kV以下电压等级的设备多采用保护测控一体化的装置。各间隔的设备通过站内现场总线或局域网互联，并与变电站层的设备通信。变电站自动化系统的主要功能为：数据采集、电气设备（如断路器）状态的监视、控制和调节，保证变电站的正常运行和安全；发生事故时，瞬态电气量的采集、监视和控制，事故后完成变电站恢复正常运行的操作。

农村配电网自动化　采用计算机技术、通信技术及配电开关设备等，实现配电网的数据采集、实时监控、故障隔离并恢复对非故障区域的供电。配电网自动化的建设模式包括无主站配电网自动化建设模式和基于主站的配电网自动化建设模式。无主站配电网自动化建设模式包括重合器-时间电流型分段器模式、重合器与电压-时间型分段器模式，在中压馈线安装自动化开关设备，通过整定使自动化开关设备相互配合，在中压馈线发生瞬时性故障时，自动恢复全部负荷供电；在中压馈线发生永久性故障时，实现故障区域自动隔离并自动恢复受故障影响的健全区域供电；可根据需要实现故障报警、故障记录和故障指示等功能。基于主站的配电网自动化系统为分层结构，第一层为馈线远方终端［柱上开关终端（feeder terminal unit，FTU），配电站所终端、环网柜终端（distribution terminal unit，DTU）和配电变压器终端（transformer supervisory terminal unit，TTU）］等终端设备组成的现场设备层（见配电网自动化系统终端）；第二层为配电子站层，集中现场设备信息；第三层为配电网自动化主站，采用分布式计算机网络结构，主站设备可采用冗余和非冗余配置。在条件允许的地区，建议建设配调一体化系统，同时实现配电网自动化功能和县级调度自动化功能。基于主站的配电网自动化系统的主要功能包括模拟量、数字量、脉冲量和状态量的采集，数据传输、数据处理，控制及远方设置，事故报告，人机联系，故障处理，高级应用，系统维护，Web浏览及运行管理等。

电力用户用电信息采集系统　采用计算机技术、通信技术及用电信息采集终端等，实现用电信息的自动采集、计量异常监测、电能质量监测、用电分析和管理、相关信息发布、分布式能源监控、智能用电设备的信息交互等功能。用电信息采集终端是采集各信息采集点用电信息的设备，简称采集终端，可以实现电能表数据的采集、数据管理、数据双向传输以及转发或执行控制命令。用电信息采集终端按应用场所分为对专用变压器用户用电信息进行采集的专用变压器采集终端、对低压用户用电信息进行采集的集中抄表终端（包括集中器、采集器）、对接入公用电网的用户侧分布式能源系统进行监测与控制的分布式能源监控终端等类型。

发展与展望　中国农村电力网自动化起源于20世纪50年代后期，首先是从调度自动化技术应用开始，最早的遥测装置是50年代后期和60年代的电子管单路遥测发送装置和单路遥测接收装置，遥信、遥控装置是采用继电器逻辑的远动装置，这些装置在当时的电网调度管理中发挥过一定的作用，但由于容量小、精度低、速度慢等原因不能满足电网发展的需要。60年代中期开始随着电子元器件和信息技术的发展，中国在数字综合远动装置中，将数据通信、计算机技术引进了远动技术领域，使远动技术在原理上有了一个飞跃。90年代中期，县级电网调度自动化广泛采用Windows95、98、2000或Windows NT操作系统作为软件平台，PC服务器/高档PC机作为硬件平台，实现调度管理功能。2000年，开始采

用Windows/Unix混合软件平台，小型计算机/图形工作站作为硬件平台，实现高级应用软件功能。2005年，开发研制电力系统自动化一体化应用软件平台，采用统一的实时分布式数据库系统，统一标准的网络通信规约和图形界面，实现了县级电网调度自动化、配电网自动化等系统的一体化。2010年，调度自动化、变电站自动化等技术已广泛应用，县级电网调度自动化系统达到实用化要求的比率达80%以上，110kV及以下变电站无人值班比率超过50%。配电自动化系统在县城、工业园区等可靠性要求较高的重要区域推广应用，电力用户用电信息采集系统已在一定范围内试点应用。

未来农村电力网的发展方向是将调度自动化系统、配电网自动化系统、用电信息采集系统等实时系统的资源进行整合和数据集中处理，实现监控一体化和管理一体化。农村电力网自动化下一阶段的发展需重点满足智能变电站的发展、分布式电源的接入及互动化用电需要的提出等方面的技术需要。

nongcun dianqihua

农村电气化 (rural electrification) 使农村安全、经济、有效地使用电能，达到一定用电普及率或附加一定的用电水平。农村电气化是农业现代化的重要组成部分，主要通过农村用上电能的普及范围和消耗电能占总消耗能源的比重来衡量。农村电气化的主要技术指标包括通电率，用电水平，电能质量，电网结构，农村电源建设以及农村电气化县、乡、村建设情况和农村电力体制改革程度等。通电率具体指户户通电率；用电水平一般是指县及县以下人口年均用电量；电能质量具体是指“两率”，即农村电网用户电压合格率和供电可靠率；电网结构主要是农村电网等级序列；农村电源建设是指可再生能源的开发情况；农村电气化县、乡、村建设情况具体指通过重点实施农村电气化县、乡、村工程，建成现代化的农村电气化县、乡、村的数量；农村电力体制改革程度主要是指政企分开、厂网分开、股份制改革等情况以及农村电力市场体系的完善程度。农村电气化受到世界上多数国家的普遍重视，各国在不同的发展时期都制定了相应的标准，评价技术指标也有所差异。农村电气化的重要作用：①改善农村生产条件，提高农村劳动生产率；②促进农副产品加工业和乡村工业的发展；③减少农民用煤和用薪材量，有利于改善生态环境；④提高农村物质、文化生活水平。图所示为现代电气化村落。



现代电气化村落

2011年，中国已基本实现农村电气化，之后加快了新农村电气化建设的进程。（见中国农村电气化）

1957年，美国已宣布基本实现农村电气化，随后不断提高农村供电可靠性和服务质量，提高农村用电水平和扩大农村用电项目，并进一步提高农村用电的效益。（见美国农村电气化）

印度是农业大国，印度农村电气化是印度农村用电普及率及用电水平的综合反映。印度从20世纪50年代初开始实施农村电气化计划。自70年代起，农村电气化发展速度加快，电力在全国各邦开始使用。到1983年初，有32万个村庄通了电，占全国村庄总数的56%。印度农村电气化主要是推广使用电动机进行农田排灌。1966年全国有电动排灌水泵50万台，到1983年，发展到496万台。1997年印度政府电力部发布了农村村落电气化的新定义：在一个农村村落范围内，电力被应用于任何目的的用电时，该村落被认为是电气化了。印度农村电气化包括两方面内容：①向农村生产活动的用电设施如小型排灌、农村工业提供电力；②农村村落的电气化。印度政府注重开发新能源，利用太阳能、风能及小水电解决农村电气化问题。印度主管农村电气化的机构有电力部，另有成立于1969年的农村电气化有限公司REC（Rural Electrification Corporation），其职责是帮助电力部制订农电计划，为向农村排灌、农村工业、生活照明、路灯提供电力的项目提供贷款，还在技术、能源利用以及法律知识方面给用户提供服务。为降低农村电气化建设工程造价，提高工程质量，REC制定了310个技术规范和基建标准。REC贷款期限为10～30年，当未通电区域的负荷达到5MW时贷款才能得到批准。

另外，还有一些发展中和欠发达国家正在实施农村电气化或加快农村电气化的发展速度，逐步实现农村电气化并使农村电气化规范化和标准化。

nongcun dianyuan

农村电源 (rural power sources) 为农村及农业区域用户提供电能的发电装置、发电厂和电力系统，包括大电网（电力系统）、小水电站、小火电厂、柴油发电机组、微型燃气轮机发电机组以及新型可再生能源发电装置等。新型可再生能源发电装置主要包括光伏发电装置、风力发电机组、生物质能发电装置、潮汐能电站等。

发达国家在实现农村电气化过程中，农村电源的发展大都经历了由小发电厂、小电网供电到大型发电厂、大电网（电力系统）供电的过程。部分发展中国家还处于小电厂、小电网的供电状况，存在供电质量较差和可靠性不高等问题，这些国家将进一步发展农村电源，扩大农村用电普及率，逐步满足农村电力用户对电能的需求，但在一定时期内仍将以中小型电厂或电网供电为主。中国的农村电源已由小电厂、小电网供电发展到主要由大电网供电的阶段，但小电厂特别是中小水电厂仍然占有一定的比重。随着智能电网的发展，一些清洁、高效的小型风力发电、光伏发电、风光互补发电、生物质发电等新型分布式电源发展迅速。

发达国家农村电源的发展将进一步提高农村电网的供电质量和供电可靠性。发展中国家将进一步发展大电网供电和中小型电厂供电，中小水电的单座容量、调节能力将有所

提高。

中国农村电源为县级（县级市、旗）区域县城、农村及林牧区用户提供电能的发电装置、发电厂和电力系统。1910年，中国修建第一座水电站，见图1。20世纪30年代起，农村电源由城市电网向农村的延伸和小电厂或发电机组构成，发展速度缓慢。50年代末农村小水电站发展开始加快，1960年全国已有1100个县建成小水电站8975座、装机容量23.83万kW。60年代初，中国实施以大电网供电为主、大电网供电和农村小型电站并举的发展农村电源的方针，从此，大电网向农村供电快速发展，逐渐形成35、66、110kV农村电力网，占农村电源的主导地位，小火电、小水电的发展速度一度曾相对减缓。中国有丰富的中小水电和中小火电资源，有1104个县的小水电可开发容量超过1万kW，1220个县有煤炭资源，有相当部分可用于发电。因此，在大电网电源紧张、缺电严重的60年代末到80年代，农村中小型电站特别是小水电站又有了较快的发展。农村小水电站平均每年新增装机容量：60年代约7.8万kW，到70年代增为59万kW，主要建在中国南方十省区。同时，在中国北方煤炭资源丰富地区（山西、河南、内蒙古、东北等），小火电也有一定的发展。到80年代中已形成大电网供电为主、农村中小电厂供电为辅的农村电源格局。到1986年，农村电源的供电量超过了1330.69亿kW·h，其中大电网供电量超过了1060.89亿kW·h，小水电站供电量超过了195.6亿kW·h，小火电厂供电量超过了55.6亿kW·h，柴油发电量超过了17.76亿kW·h，风力发电及其他供电量约为0.88亿kW·h。

80年代末到90年代末，中国大型发电厂建设速度逐步加快，缺电局面逐步改善，农村可以从大电网获得更充足、更可靠的电能，从经济效益、能源利用效率和环境保护的观点出发，中国限制凝汽式小火电的发展。在以小水电为主要电源的地区，为了提高供电可靠性和保证率，克服多数小水电站没有调节能力的缺陷，多采用小水电供电网与大电网联网或多个小水电站联网形成独立电力网。此外，还建设容量较大的中型水电站及具有一定调节能力的骨干水电站。大电网供电与小电站供电相结合，使中国农村缺电现象有了明显好转，供电质量大大好转。到1999年，农村电源的供电量约为4981.68亿kW·h，其中大电网供电量约为3872.15亿kW·h，小水电站供电量约为547.09亿kW·h，小火电厂供电量约为484.23亿kW·h，柴油发电约为74.5亿kW·h，风力发电及其他供电量约为3.7亿kW·h。



图1　云南石龙坝发电厂
（建于1910年，中国大陆第一座水电站）

为解决边远农村、牧区的用电电源，国家还发展了小型新能源发电装置，包括小型风力发电、太阳能光伏发电、生物质发电、地热发电和潮汐能发电。国家持续实施了一系列农村能源建设工程，安排农村电网建设与改造，加强无电地区电力建设，建设大量新型发电厂。到1999年底，中国已安装小型风力发电机组15万台，太阳能光伏发电装置16万套，解决了分散居住的农牧民近30万户超过100万人口的用电问题。进入21世纪后，风力发电、小水电、太阳能光伏发电及热利用、生物质发电等各种分散的可再生能源资源和废弃物资源发电，满足农村地区，特别是偏远地区人民生活和生产的用能需要。截至2010年底，全国农村建设了200万kW农林剩余物直燃发电厂，年发电量超过100亿kW·h。建成太阳能独立光伏电站800多座，安装太阳能户用光伏系统10万余套，以及部分风光储微电网试点工程（见图2），为解决偏远地区居民基本生活用电发挥了作用。



图2　内蒙古陈巴尔虎旗赫尔洪德风光储试点工程
（2012年建成、投运并网发电，风力发电总容量50kW，采用110kW光伏并网发电系统，建设规模为42kW·h的锂离子蓄电池组）

nongcun gongye yongdian

农村工业用电　(electricity consumption of rural industry)　农村工业企业生产等消费电能的行为。农村工业用电主要包括采掘、钢铁、机械、化肥、建筑材料、纺织、造纸工业等方面用电。

1970年以后，随着农业生产和农业机械化的发展，乡村开始发展农机修配、小化肥、小农药和农机制造等类型企业，推动了乡镇工业的兴起和乡镇工业用电的发展。1976年，乡（镇）工业用电量达35.26亿kW·h，占农村用电量的15.7%。1980年，乡（镇）工业用电设备容量达1160.37万kW，乡（镇）工业用电量达到69.98亿kW·h，占当年农村用

电量的18.68%。20世纪80年代乡（镇）工业逐步向采掘、钢铁、纺织、建材、造纸等行业扩展，用电量大幅度增长。到1990年，乡（镇）工业用电量达377.19亿kW·h，占农村用电量的37.22%，其中村及以下工业用电量达136.63亿kW·h。2000年，农村工业用电量达1449.07亿kW·h，占农村用电量的49.6%，是农村用电的第一大户。20世纪末，部分大工业开始向农村转移，农村工业用电构成由原来相对单一的乡（镇）工业用电演变成包括大工业用电及非工业用电、普通工业用电为主的新的用电格局，用电量也随之大幅度上升。2005年大工业用电及非工业用电、普通工业用电约占农村用电总量的49%。2010年大工业用电及非工业用电、普通工业用电约占农村用电量的40%。

农村工业的发展对调整农村经济结构、转移农村剩余劳动力、繁荣农村经济、增加农民收入，起到了巨大的作用。农村工业用电在不断增长的同时，将逐步降低产品用电单耗，节约用电，增加电能使用效率。

nongcun jumin shenghuo yongdian

农村居民生活用电 (electricity consumption of rural residents living)　农村居民用户以生活需要为目的消费电能的行为。通常以年人均生活用电量衡量居民生活用电水平和生活的现代化程度。

农村居民生活用电的特点是：用电负荷比较集中，同时率高，自然功率因数比较低，生活用电集中时段一般可形成农村用电日负荷曲线的最大负荷。

中国农村居民生活用电在20世纪50年代已有一定发展。随着农村电源、农村电力网供电范围的扩大，居民生活用电量不断增加。1980年之前中国农村用电特点为：①用电项目少，仅限于照明和收音机用电；②人均生活用电量低且增加缓慢；③生活用电普及率不高。1980年以后，随着改革开放的逐步深入，农民生活明显改善，生活用电普及率不断提高，电视机等家用电器也逐步进入农户家庭，使生活用电水平得到较快发展。进入21世纪，农村居民生活用电项目不断扩大，对供电可靠性的要求逐渐提高，欠发达的西部地区生活用电也有较大增长。尤其2007年国家启动家电下乡政策后，彩色电视机、电冰箱、洗衣机、空调等大容量家用电器越来越多地进入农户家庭，生活用电负荷增长迅速。2010年人均生活用电量较2000年翻了两番。东部一些发达地区部分农村居民年人均生活用电量已经达到或超过了县城甚至城市水平。中国农村居民生活用电发展概况见表。

中国农村居民生活用电发展概况

年　份		1962	1975	1980	1990	2000	2010
农村居民生活用电	用电量（亿kW·h）	3.2	51.74	63.11	208.40	700.84	2134.09
	占农村用电比例（%）	21.9	26.8	16.85	20.57	23.99	23.20
农村居民年人均生活用电量（kW·h）			6.78	7.94	23.1	77.24	317.98

nongcun peidian taiqu

农村配电台区 (rural distribution area)　农村电力网中实现中压10（20）kV或高压35kV变为可供用户直接使用的低压0.4kV、汇聚与分配电能、调整电压、对设备与低压线路进行保护和控制等功能的最末一级配电设施。农村配电台区（见图）一般建在负荷中心附近，其中采用35/0.4kV配电变压器及配套设备供电的配电台区又称直配台区。农村配电台区的配电变压器基本上是三相的，也有采用单相配电变压器及配套设备为单相用电负荷供电，通常将这样的台区称为单相配电台区。单相配电台区在江西、安徽、内蒙古和江苏等省农村电力网中得到了应用，在降低农村电力网线损、改善电压质量、降低电网建设投资和金属消耗等方面具有一定效果。随着智能电网的发展，农村配电台区逐步向智能化方向发展，出现了智能配电台区。



农村配电台区

农村配电台区构成　由配电变压器、高压配电设备、低压配电设备、无功补偿装置和附属建筑物等部分构成。

配电变压器的功能是传送电能和降低电压。通常选用1台配电变压器，少数农村、企业或县城配电台区选用2台及以上配电变压器。配电变压器容量一般考虑5年期的负荷发展。农村电力网正在加速淘汰高能耗配电变压器，采用S11及以上型号配电变压器、非晶合金铁芯变压器、调容变压器等节能型配电变压器。

高压配电设备有避雷器和高压开关电器。避雷器的功能是防雷保护，高压开关电器的功能是对配电变压器运行进行保护和控制。当配电变压器容量小于500kV·A，高压开关电器一般采用高压跌落式熔断器对配电变压器内部短路进行保护，也可以选用熔断器和负荷开关进行保护。当配电变压器容量大于500kV·A时，高压侧一般用高压断路器和隔离开关进行保护。

低压配电设备主要有配电箱、计量装置和低压避雷器。其功能分别为对变压器及出线的运行进行保护、控制与监测，计量电能和对配电变压器进行防雷保护。配电箱内装有电压表、电流表（有时加装有功功率表、无功功率表）、进线总保护开关电器和各条出线回路的开关电器。315kV·A及以下配电变压器一般采用低压熔断器和隔离开关作为总保护，容量超过315kV·A的选用低压断路器保护。低压侧总保护具有过负荷和过电流保护功能。当采用熔断器保护时，熔体额定电流按变压器允许过负荷倍数和熔体的熔断特性确定。当采用低压断路器时，过负荷保护为延时动作，动作电流根据变压器低压侧允许过负荷电流确定；过电流保护为瞬时动作，动作电流为变压器低压侧额定电流的6～8倍。各出线回路的保护动作应与总保护相

配合，保证保护动作的选择性。计量装置为电能表及箱体，有时加装防窃电设施。在雷电活动频繁的地区，低压侧加防雷设备。对于超过40雷暴日的多雷区，出线回路首端加装氧化锌避雷器，对反变换过电压进行保护。对于超过90雷暴日的地区，可采用Z形接线变压器，对正变换、反变换过电压进行防护。

无功补偿装置可以补偿配电台区配电变压器、低压线路和台区负荷需要的无功功率，提高功率因数。农村配电台区无功补偿装置有并联电容器和静止补偿装置两类，可采用三相或单相补偿，一般其补偿容量按单台配电变压器容量的10%～40%配置，保证用电高峰时配电变压器的功率因数达0.95以上。

附属建筑物由构架（杆、柱）或砖石高、低台或房屋构成。其功能是安装、固定变压器和高低压配电设备，并进行安全防护，使之能安全可靠运行，防止洪水冲、泡和外来意外损坏。

农村配电台区分类　农网配电台区按其配电变压器安装方式主要可分为10kV配电站、10kV箱式变电站和10kV柱上变压器台3类。

10kV配电站的配电变压器、高压配电设备、低压配电设备等全部安装在建筑本体内。按照配电变压器的容量和形式等，10kV配电站又可分为多种典型设计类型，其单台变压器容量一般为200～630kV·A。10kV配电站具有出线多，安全可靠性高、维护方便等特点。

10kV箱式变电站的配电变压器、高压配电设备、低压配电设备等在工厂内被预先组装在一个或几个箱壳内。10kV箱式变电站按照结构形式又可分为组合式变电站（简称美式箱变）和预装式变电站（简称欧式箱变）。10kV箱式变电站的单台变压器容量一般为315～630kV·A。10kV箱式变电站具有结构清晰、布局合理、技术先进、安全可靠、占地面积小、外形美观等特点。

10kV柱上变压器台的配电变压器布置在杆上或高台上，其底座距地面的距离不小于2.5m，高压配电设备布置在杆上，户外式低压配电箱布置在变压器下面的杆上或高台内。配电变压器容量为80kV·A及以下时用单杆架构或高台，80～400kV·A时用双杆架构或高台。10kV柱上变压器台具有投资少、建设地点要求低等特点。

智能配电台区　按照智能化标准建设，具有集中监控、双向互动等功能的配电台区。智能配电台区主要由节能型配电变压器、智能低压配电箱和智能配电变压器终端三部分组成。其中，智能低压配电箱采用间隔单元的标准化设计，各间隔单元按照功能模块进行划分，纵横分区布置，相互独立，实现“即插即用”，各间隔单元有明显标志。智能配变终端可以对配电变压器运行信息进行采集，实现配电变压器监测与保护、电能计量设备管理、用电负荷管理、电能质量管理、台区经济运行管理、互动化管理、接入公用电网的用户侧分布式能源监测与控制，并对采集数据进行管理和双向传输。

智能低压配电箱按照功能配置的不同，分为简洁型、标准型和扩展型3种。简洁型智能低压配电箱的主要功能为配电变压器监测与保护、事件及告警处理、人机交互、用电信息监测、计量管理、剩余电流动作保护、状态监测、负荷管理、无功补偿、安全防护、通信功能、互动化管理。标准型智能低压配电箱的主要功能是在简洁型智能低压配电箱的基础上，增加了环境监测、分布式电源接入管理、资产管理及视频监视功能。扩展型智能低压配电箱的主要功能是在简洁型智能低压配电箱的基础上，增加了环境监测、分布式电源接入管理、资产管理及视频监视、有源电力滤波功能。2010年中国农村电力网进行了智能配电台区的试点建设，随着农网智能化建设的全面展开，农村智能配电台区建设将快速稳步发展。

nongcun peidianwang

农村配电网　（rural distribution network）　在中国，供应县级（县级市）范围内的乡镇和农村用电的配电网，简称农网。农网的负荷、变电站的结构、设备、无功补偿和电压调整等，有其自己的特点。农网的供电质量一般较城市电网低，随着中国实施城镇化发展战略以及农村生产的发展和生活水平的提高，对农网供电可靠性和电能质量的要求也将越来越高，城乡用电要求的差别在逐步缩小。图示为农网改造现场。



农网改造现场（凡利达　摄）

农网的特点　①农村配电线路以辐射形架空线路为主，一般馈线距离长、供电半径大。②农村负荷一般较分散、负荷密度较低、负荷季节性变化较大。③农网线路多分布于宽广的农田、树林或山区，易受风、雪、冰、雷、雨、雾等自然灾害的危害，因此，农网故障率相对较高。④农网的用电峰谷差大，季节性强，气候影响大，农村配电线路和配电变压器的平均负荷率较低。⑤农村配电线路的无功负荷（包括配电变压器和感性用电设备的无功负荷）大，末端电压降大，需要无功补偿。

农网的负荷　大致分为3类。第一类是农业用电和农村生活用电，此类负荷对供电质量要求相对较低，但是其中对抗洪排涝及电力排灌用电在汛期内必须确保。第二类是乡镇用电，主要是商业、居民用电，也有工业用电，这些已逐步城市化，因而其供电可靠性和电能质量要求均接近城市用电水平。第三类是乡镇企业和乡镇工矿用电，这类负荷性质的差别很大，对供电质量的要求也有很大差别。

农网变电站　农网的10kV配电线路都是由35/10kV或110（66）/10kV变电站供电。农网变电站的发展方向是逐步增加变电站布点，缩小供电半径；变电设备采用经济、可靠的户外小型成套装置，少维护或免维护的开关设备，利用先进通信技术与配电网安全监控和数据采集系统（DSCADA系统）结合建立无人值班变电站；有条件的变电站间利用馈线实现互联，进一步提高供电

可靠性。

农网配电变压器　由于农业生产用电的时间性与季节性都很强，平均负荷较低，其空载无功功率损耗占很大比重。农用配电变压器数量大，分布又广，采用新型的空载损耗低的变压器，如非晶合金铁芯配电变压器，是农业用电节能的重要措施之一。

农网无功补偿　采用并联电容器组进行补偿。其技术方针是全面规划、合理布局、分级补偿、就地平衡，集中补偿与分散补偿相结合，以分散补偿为主；高压补偿与低压补偿相结合，以低压补偿为主；调压与降低电能损耗相结合，以降损为主。对于较长的配电线路与多分支配电线路的无功补偿，则以低压分散和就地补偿为主。

nongcun yongdian

农村用电　(rural electricity consumption)　农村用户消耗电能的行为。农业用电、农村工业用电、农村居民生活用电等都属于农村用电。农村用电水平的提高，对增强农业抗御自然灾害的能力，促进粮食增产，发展农村工商业，调整产业结构，安排剩余劳动力，改善生产和生活条件，增加农民收入等都发挥了重要作用。与城市用电比较，农村用电具有用电负荷分散、密度小、峰谷差大，年用电最大负荷利用小时低、用电季节性强、自然功率因数低等特点。

农村用电的发展　世界多数国家农村用电的发展滞后于城市用电和工业用电。19 世纪末一些国家开始使用电能，而农村用电一般起始于 20 世纪二三十年代，有些国家的农村用电则起始于 50 年代。多数国家的农村用电是从电力提水灌溉开始。随着农村经济的发展，农村用电项目逐渐增加，农副产品加工、大田作业、电热育秧与烘干、温室温床、热泵暖房、冷冻贮藏、园艺栽培及畜牧业、养殖业等用电项目逐渐发展。随后又相继出现为农产品加工和农业生产服务的工业、由城市转移到农村的工业、农村地区小型采矿业及商业等用电类型。农村供电事业的不断发展，使农村用电量增加，农村人口人均用电量和农村、农户用电普及率不断提高。世界发达国家农村用电普及较早，发展中国家相对发展速度较慢，到 20 世纪末一些发展中国家的用电水平仍然较低，农村用电普及率为 50%～70%，农村年人均用电量在 10kW・h 数量级甚至更低。进入 21 世纪，发展中国家的农村用电水平不断提高，用电种类、项目不断扩大，并逐步向提高用电效率、节约用电的方向发展。农村用电设备由于受用电季节性因素影响，利用率普遍较低，随着农村经济和农民生活水平的不断发展用电设备利用率会逐步提高。

中国农村用电　始于 20 世纪 30 年代，最初仅限于电力提水灌溉和农村生活照明用电。到 1949 年，中国农村用电量仅有 2000 万 kW・h，占全国总用电量的 0.58%。五六十年代，农村用电开始发展，以当地资源自办小型电站（主要是小水电站）和城市向农村延伸的配电网为电源，解决农村生活照明用电、农副产品加工、农田排灌用电。70 年代以后，大力发展电力井灌、高扬程提水灌溉和农村小型工业用电。到 1980 年，农村年用电量增加到 374.54 亿 kW・h，占全社会总用电量的 14.88%。1990 年，全国农村用电量达 1013.30 亿 kW・h，占全社会用电量的 16.5%。1998 年以来，国家不断加强农村电网建设，促进了农村电力消费。2000 年，农村用电量达 2921.02 亿 kW・h，占全社会用电量的 22.03%。2010 年，农村用电量达 9197 亿 kW・h，占全社会用电量的 21.90%。各时期中国农村用电量见表 1。

表 1　中国农村用电量

年　份	1949	1960	1970	1980	1990	2000	2010
全社会用电量（亿 kW・h）	34.60	509.3	983.0	2516.91	6125.96	13 260	41 999
农村用电量（亿 kW・h）	0.20	6.34	86.29	374.54	1013.30	2921.02	9197
农村用电量占全社会用电量比例（%）	0.58	1.24	8.78	14.88	16.5	22.03	21.90

农村用电水平　以年农村人均用电量（年农村用电量与当年农村人口之比）表示，反映电力在农村的消费水平和农村经济发展程度。中国农村用电水平见表 2。它的特点是：①发展速度快，用电水平不断上升。1975 年人均用电量为 24.7kW・h，2010 年约为 1364.54kW・h。②总体水平低。到 2010 年，农村年人均用电量仅为全国年人均用电量的 52.58%。③发展不平衡，各地区差别悬殊。以 2010 年为例，人均用电量高的达 21 418.48kW・h，低的只有 295.31kW・h，相差约 72.5 倍。

表 2　中国农村用电水平

年　份	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2010
农村年人均用电量（kW・h）	24.7	45.7	72.3	115.4	217	321.91	1364.54
全国年人均用电量（kW・h）		255	326.59	535.80	704.42	1027.91	2595.33

农村用电构成　构成农村用电的用电产业、项目及其用电量占农村用电量的比例。中国农村用电的构成随着农村生产生活方式的进步发生了变化，2003 年以前主要由农业生产用电、乡镇工业用电、农村居民生活用电等构成，2003 年及以后主要由农业生产、排灌、大工业、一般工商业、农村居民生活用电等构成。20 世纪六七十年代，中国农村用电以农田排灌为第一大用电项目。80 年代以后，乡镇工业逐渐上升为第一大用电项目。2010 年农村大工业用电和居民生活用电成为农村用电的两大用电项目。农村各类用电构成比例随农村产业结构调整和农村社会发展而不断调整和变化。各时期中国农村用电构成见表 3。

表3　中国农村用电构成

年份			1962	1975	1980	1990	2000	2010
农村用电量（亿 kW·h）			15.17	192.9	374.54	1013.3	2921.02	9197
农业用电		农业用电量（亿 kW·h） 占农村用电量比例（%）	12.21 80.5	142.34 73.8	226.08 60.36	383.82 37.88	601.13 20.58	439 4.77
农业用电	其中	排灌用电量（亿 kW·h） 占农村用电量比例（%）	8.35 55.04	90.06 46.69	140.9 37.62	187.35 18.49	333.98 11.43	311 3.38
农业用电	其中	副业及生产用电量（亿 kW·h） 占农村用电量比例（%）	3.86 25.44	52.28 27.10	85.18 22.74	196.5 19.4	267.15 9.15	—
乡镇工业用电		用电量（亿 kW·h） 占农村用电量比例（%）			69.98 18.68	377.19 37.22	1449.07 49.61	—
居民生活用电		用电量（亿 kW·h） 占农村用电量比例（%）	3.20 21.09	51.74 26.80	63.11 16.85	208.4 20.57	700.84 23.99	2134.09 23.27
其他用电		用电量（亿 kW·h） 占农村用电量比例（%）			15.37 4.10	43.85 4.33	169.95 5.82	

美国农村用电　美国1898年开始用电动水泵灌溉农田。20世纪30年代，农村用电有了较大的发展，到1957年94.6%的农场和农村用上了电，1997年98.8%的农场和农村用上了电，农村年人均用电量达8219kW·h，农村用电量占全国用电量的比例为8%。1997年的美国农村用电中，农场与居民用电占65.1%，商业及工业用电占29.6%，排灌用电占2.4%，其他用电占2.9%。2007年美国农村用电量为36 534亿kW·h，农村年人均用电量约为91 335kW·h，其中生活用电占37%，商业用电占35%，工业用电约占28%。美国农村在农业生产及居民生活等方面已经达到了较高的发展水平，因此农村的生产及生活等方面仍将保持较高的用电水平。

俄罗斯农村用电　苏联作为俄罗斯的前身，1932年开始发展农村电气化，到1965年已有99%的农场和95%的农庄用上了电。1980年99.8%的农庄和农场使用由大电力系统（大电网）或大型发电厂供应的电能，农村年人均用电量达1134kW·h，农村年用电量为1110亿kW·h，占全国用电量的8.6%。1985年农村年人均用电量为1570kW·h，农村年用电量为1570亿kW·h，占全国用电量的11.8%。其中，农业生产用电占76.8%，农民生活用电占14.2%，农村公用用电占9%。农业生产用电中，牲畜和家禽饲养用电占54.6%，作物栽培（含灌溉）用电占30.3%，辅助企业用电占15.1%。1999年，俄罗斯农村用电量为720亿kW·h，约占总用电量的10%，其中生活用电和生产用电各占50%。随着俄罗斯经济社会的快速恢复，其用电水平将不断提高。

nongye yongdian

农业用电　(agricultural electricity consumption)

在农业生产中消费电能的行为（见农村用电）。农业用电包括排灌用电、农业生产用电和农副产品加工用电，主要为农业、林业、牧业及水利业等生产服务。排灌用电包括农田排涝、提水灌溉（漫灌、喷灌和滴灌）等用电。农业生产用电包括田间作业的耕作、植保和收摘用电，场上作业的脱粒、扬净和烘干用电，畜禽业的供水、粪便清理、取暖、挤奶、剪毛、孵化及空气调节用电，水产养殖的充氧、换水、过滤、调温用电，以及运输、贮藏、种子处理、育苗、温室及工厂化农业用电等。农副产品加工用电包括粮、棉、油、糖、茶、丝、麻、水果、蔬菜、禽、蛋、奶等农产品加工的用电。

农业用电形式　主要有电力拖动、电加热和电光辐射用电3种形式。

农业电力拖动用电是以电动机拖动农业机械的用电。常用的有脱粒机、扬场机、粉碎机、挤奶器、奶初加工机械、谷物加工机械、畜牧机械、蔬菜果品加工机械及抽水、排灌用水泵等。其用电特点是间断性用电，季节性强。

农业电加热用电是将电能转换为热能的用电。常用的有电热育秧、电热烘干、电热温床、畜舍取暖、电热孵化、电热水器等。根据农作物和牲畜的需要，利用电加热可以较精确地控制环境的热参数，促进其生长发育。电热负荷一般比较平稳，并可适当错开负荷高峰。

农业电光辐射用电是将电能转换为光能的用电。常用的光辐射源有节能灯、白炽灯、紫外线辐射、金属卤化物灯等。节能灯、白炽灯主要用于农村生产、生活照明。波长为380～760nm的可见光，可作为植物光合作用的能源和育苗设施的补充光照，用于育雏舍、蛋鸡舍内延长光照时间，提高蛋鸡的产蛋率。紫外线辐射可用于增强畜禽的免疫力，提高产蛋、产奶率，增加体重。波长为365nm左右的紫外线光源，具有很强的诱虫作用，用于杀虫可节约大量农药，提高农作物产量，是农作物杀虫用灯的理想光源。这类用电负荷比较稳定，利用率较高。金属卤化物灯主要用于体育场馆、演播室和商店照明。

中国农业用电发展概况　1923年中国江苏省农村开始农田排灌和碾米加工用电，图示为1928年浙江吴兴城厢电灯公司在青铜门外试验用电犁耕田。20世纪50年代开始发展电力排灌和农副产品加工用电。60年代中国加快了农业用电的发展，在350多个粮食高产县和190多个产棉县大规模发展农田排灌用电，同时发展农副产品加工用电。农业用电量上升迅速，其中排灌用电成为农业用电甚至整个农村用

电的最大用电类型。进入70年代，国家大力发展电力井灌和高扬程提水灌溉，使排灌用电继续高速发展，为农业高产、稳产起了关键作用。80年代中国农村经济发生变革，农民生活不断改善，乡镇工业用电量和农民生活用电量快速提高。2000年以来农副产品加工业在农村得到了较快发展，尤其是特色农产品的加工甚至成为部分地区的支柱性产业，带动了农业用电量的快速增长，达到601亿kW·h，约占农村用电量的20.58%。2006年底，国家确定发展现代农业为新农村建设的首要任务。随后，国家一方面加快推进现代农业的发展，农业设施及装备水平不断提高，农业用电结构发生了一定变化；另一方面深入推进低碳经济发展，推广低能耗农机设备，农业用电效率不断提升。2010年，中国农业用电为439亿kW·h，约占农村用电量的4.77%。



1928年浙江吴兴城厢电灯公司在青铜门外试验用电犁耕田



排灌的发展纳入国家经济发展计划，在350多个粮食高产县和190多个产棉县重点建设32个商品粮棉基地，大力发展农田排灌用电，使排灌用电进入高速发展时期。70年代大力发展电力井灌和高扬程提水灌溉，使排灌用电成为农业用电甚至农村用电的主要组成部分。80年代初排灌用电量曾发生负增长，1985年后保持正增长状态，主要集中在河北、山东、河南等地区。2012年，国家在黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古四省启动了“节水增粮行动”，计划到2015年发展高效节水工程面积3800万亩[1]，发展喷灌面积1600万亩，微灌面积2066万亩，管道输水灌溉工程面积134万亩，“节水增粮行动”共涉及188个县（旗），该项目的落实将使这些县（旗）供电企业的排灌用电量快速增长，灌溉用电单耗将不断降低。各时期中国排灌用电发展概况见表。



电力排灌工程

paiguan yongdian

排灌用电 (electricity consumption for irrigation and drainage)　以农田排水和灌溉为目的消费电能的行为，是农业用电的一部分。电力排灌（见图）以电动机拖动水泵提高水位（抽水、提水）进行灌溉（给土地补充水分以防旱）或将水排出（减少土地中水分以防涝），是保证农作物高产稳产的重要措施。排灌受制于水文和农时条件，因此排灌用电负荷具有较强的季节性、时令性，且对供电可靠性的要求较高。

中国的排灌用电始于1923年。20世纪50年代排灌用电开始小规模发展，1960年排灌设备容量共67.92万kW，建设电力排灌农田约400万hm^2。60年代初，中国将电力

中国排灌用电发展概况

年　份	1962	1971	1980	1990	2000	2010
排灌用电量（亿kW·h）	15.17	58.86	140.90	187.35	333.98	311
电力排灌设备容量（万kW）	154.71	886.41	2501.88	3345	4311.47	
全国耕地面积（$\times10^3hm^2$）			99305.20	95672.90	97877.93	109870
电力排灌面积（$\times10^3hm^2$）	3848.00	14201.00	19411.30	22683.30	34047.87	60347.70
电力排灌面积占耕地面积比重（%）			19.54	23.70	34.79	54.93

peidian

配电 (distribution of electricity)　从输电网或地区发电厂与分布式电源接收电力，就地或逐级向各类用户供给和配送电能的过程。配电是电力系统中连接发电、输电与用电的关键环节。配电系统运营商（供电企业）通过不断地采用配电新技术、完善配电系统的管理，提高用户供电质量以及配电系统的运行效率。

配电系统　配电网及其二次系统组成的整体。从输电网或地区发电厂与分布式电源接收电力，就地或逐级向各类用户供给和配送电能的电力网称为配电网，其二次系统完成配电网的测量、保护调节、控制等功能，包括继电保护系统（见配电网继电保护）、配电网自动化系统、计量系统（见电能计量管理）等。

基本要求　安全性好、供电可靠性与电能质量满足用户要求、资产利用效率高、电能损耗小、运行维护成本低、配电设施与周围环境相协调。

特点　①配电系统对供电质量水平有着决定性的影响。配电系统直接与用户连接，系统中任何故障、扰动都直接影响对用户的供电质量。国内外统计数据均表明，中低压配电网引起的停电时间占用户总停电时间的比例超过80%。②在电力系统整体电能损耗中，大部分产生在配电网，配电网（包括高压配电网）的损耗约占系统总损耗的70%，中低压配电网的损耗约占系统总损耗的50%。③配电元件众多，一个城市的配电元件数量达数十万甚至上百万个，是同地区输变电元件的数十倍，设备的标准化程度比较低，管理维护工作量巨大。④配电网接线形式种类多，运行方式多变。⑤受城乡市政建设、发展的影响，配电元件与网络结构变动频繁，异动率高。⑥配电系统是城乡基础设施的组成部分，分布在人类活动频繁的区域，易受外界干扰、人为破坏，故障率高，是输电线路故障率的数十倍甚至上百倍。⑦配电系统管理业务综合性很强，不像输电系统管理那样有着很细的专业分工。⑧随着分布式电源的大量接入，传统上

[1] 1亩=$6.6667\times10^2m^2$。

只是单向接收输电网电力的配电网，将转变为功率双向流动的有源网络，给配电网的规划建设与经营带来新的挑战，增加了配电网保护、控制、运行调度与管理的复杂性。

配电电压等级　在配电系统中使用的标称电压值系列。中国分为高压配电、中压配电、低压配电三个等级系列。（见配电网电压等级）

配电管理　包括配电规划建设管理、配电运行管理、设备检修管理等。其中配电运行管理和设备检修管理称为配电生产管理。

配电规划建设管理　包括配电规划管理与配电建设管理。①配电规划管理。制定配电系统在未来较长一段时期内改造、建设和发展计划的管理活动。其目的是指导配电系统有序地进行工程项目的改造、建设，使配电网既能稳定地满足用电需求，提供安全可靠、电能质量合格的电力，又做到投资合理，电能损耗小，运行维护成本低，实现供电企业自身的可持续发展。②配电建设管理。供电企业为满足用户用电需求建设新的配电设施（配电所等）或安装新的设备（馈线、开关设备、变压器等）的管理活动。

配电运行管理　使配电网及其设备处于安全、可靠、优质、经济运行状态所进行的管理活动。应用先进的技术与管理手段，优化配电网及其设备的运行方式，保证对用户的供电质量、降低损耗、提高设备利用率、节约运营成本。包括调度运行管理、设备运行管理、供电可靠性管理、电能质量管理、电能损耗管理。（见配电网运行管理）

设备检修管理　为保证配电网设备健康水平，确保安全不间断地供电而进行的必要的维修活动。包括为使设备保持原设计的性能而进行的维修工作，或根据运行条件的变更而部分合理改造原有设计的工作。是消除设备安全隐患，保证配电网可靠运行，提高供电可靠性，确保人身安全的重要手段。

配电关键技术　包括规划技术、设备制造技术、检修技术、继电保护与控制技术、电能质量控制技术、配电自动化技术、分布式电源并网技术等。

规划技术　支撑配电网规划的技术措施。包括负荷预测技术、计算机辅助分析与设计技术等。负荷预测技术是指能比较准确地拟合历年电力负荷增长曲线或描述电力负荷与其他相关参数发展关系的数学模型及其系数指标，并据以预测规划期负荷增长值的技术。负荷预测的客观、正确，将影响到规划新建配电网装备规模及其投资。实际应用的技术方法主要包括时间序列增长趋势模型法、相关参数预测模型法、对比借鉴方法、专家经验咨询方法等。（见配电网规划）

设备制造技术　配电设备的制造技术。主要的配电设备包括断路器、负荷开关、导线、电缆、配电变压器等。配电设备技术的发展方向是小型化、低损耗、免维护化与智能化。例如，应用全封闭绝缘设备技术、全封闭组合电器技术，增强设备免维护或少维护的功能；应用新型电压/电流传感器技术，减少开关设备体积，节约成本；应用非晶合金铁芯等高效节能技术，降低变压器损耗；应用可控无功补偿技术，提高电能质量，降低网络损耗；应用机电一体化技术，实现设备智能化。

检修技术　支撑配电网设备检修的技术措施。主要包括配电网设备在线监测技术、配电网不停电作业技术等。在线监测技术对设备整体或其相关零部件性能工况的状态特征量进行检测鉴定，判断其运行状态有无异常与劣化征兆，或对异常情况进行追踪，预测其劣化趋势，确定其劣化程度，以便采取针对性控制措施，防止故障发生，从而减少故障停运时间与停运损失，提高设备利用率。不停电作业技术对配电网设备进行测试、检修、维修和更换部件，是提高供电可靠性的重要手段，对增加供电企业售电量、提高作业效率、提高用户服务质量具有明显的意义。（见配电网设备检修）

继电保护与控制技术　支撑配电网继电保护与控制的技术措施。

（1）继电保护技术。应用继电保护装置，在配电网故障或异常时，向所控制的断路器发出切除故障元件的跳闸命令或者向运行人员发出告警信号，其作用是消除或减轻故障对配电网及其元件的危害，避免故障引起的停电或减少故障停电范围。（见配电网继电保护）

（2）控制技术。主要包括无功功率与电压控制技术和消弧线圈自动调谐技术。①无功功率与电压控制技术。通过投切无功补偿装置、调整运行方式，保持配电网整体或部分电压水平和无功功率平衡，其目的是实现配电网无功功率平衡，尽量避免从输电网吸收无功功率或减少吸收的无功功率数量，从而降低电能传输损耗，提高电压质量（见配电网无功功率与电压控制）。②消弧线圈自动调谐技术。通过调整消弧线圈电感参数，实现非有效接地系统（见中压配电网中性点接地方式）单相接地故障电流跟踪补偿，在适当的时机将消弧线圈装置调整到合理的补偿状态，使接地电流维持在较低水平，使接地电弧更易于熄灭，故障消失后限制电网电压恢复速度，减少电弧重燃概率（见消弧线圈自动调谐）。

电能质量控制技术　应用电力电子和控制技术实现电能质量控制与改善的技术措施。利用静止无功补偿装置、静止同步补偿器、动态电压恢复器、固态开关等柔性配电设备，对谐波、电压波动和闪变、电压暂降与暂升等电能质量的指标进行控制，使其维持在符合技术标准要求的范围内。

配电自动化技术　支撑配电网运行自动化、管理自动化和信息化的技术。利用现代计算机与通信技术，将中低压配电网的实时运行、电网结构、设备、用户以及地理图形等信息集成，实现其运行监控与管理的自动化与信息化，主要包括馈线自动化技术、运行自动化技术、管理自动化技术、系统集成技术等。配电自动化技术是提高配电网运行、管理水平的重要手段，其作用包括提高供电可靠性、配电网容量利用率、电能质量、用户服务质量、管理效率以及降低线损等。分布式电源的大量接入，使配电网成为一个正常运行功率与故障电流双向流动的复杂有源配电网络。高级配电自动化满足有源配电网运行监控与自动化的需要，是配电自动化技术的未来发展方向。

分布式电源并网技术　分布式电源接入配电网以及保证含分布式电源配电网安全可靠运行、电能质量合格的技术措施。是配电技术研究的热点内容，包括分布式电源接入对配电网的影响、配电网接纳分布式电源能力的评估、分布式电源接入技术要求、提高分布式电源接纳能力的技术措施等。分布式电源在世界范围内迅速发展，正在给电力技术带来一场深刻的变革。满足可再生能源发电与分布式电源并网的需要，是智能电网提出并获得迅速发展的重要原因。在智能配电网里，不再被动地限制分布式电源接入的容量，而是从有

利于发挥分布式电源的作用、节省整体投资出发，广泛应用主动网络管理技术，最大限度地接纳分布式电源，实现配电网的优化运行。（见分布式电源并网技术）

peidian bianyaqi

配电变压器 （distribution transformer） 利用电磁感应原理将配电电压由中压变换成低压的一种静止电器。配电变压器的容量通常在 2500kV·A 及以下，容量较小的配电变压器的高、低压侧一般采用熔断器保护，容量大于 1000kV·A 的配电变压器通常采用断路器作控制保护。

基本结构 配电变压器主要由铁芯、绕组、套管、分接开关和绝缘等组成。

铁芯 由芯柱、铁轭和夹件组成配电变压器的主磁路，也是变压器器身的机械骨架。铁芯用性能良好的硅钢片或非晶合金带材制成，按结构形式分芯式和壳式两种。绕组被铁芯包围的结构形式称为壳式，铁芯被绕组包围的结构形式称为芯式。铁芯的装配一般有叠积和卷绕两种工艺，通常采用一点接地，以消除因不接地而在铁芯或其他金属构件上产生的悬浮电位，避免造成铁芯对地放电。

绕组 构成与配电变压器标志的某一电压值相对应的电气线路的一组线匝。绕组用铜导线或铜箔绕制而成，是配电变压器的电路部分，起变换电压和传递电能的作用。变压器的绕组有多种绕制方式和结构形式，芯式变压器的绕组可分为层式和饼式，层式绕组可细分为圆筒式和箔式，饼式绕组可细分为连续式、纠结式、内屏蔽式、螺旋式、交错式等。配电变压器主要采用圆筒式、箔式、连续式、螺旋式等绕组。对于高、低压绕组共同套装在铁芯上的配电变压器，通常低压绕组放在内层，高压绕组套在低压绕组的外层。高、低压绕组之间，低压绕组和铁芯之间留有一定的绝缘间隙和散热通道，并用绝缘纸筒隔开。

套管 将配电变压器内部绕组的高、低引线与电力系统或用电设备进行电气连接，并保证引线之间及引线对地间绝缘的一种装置。配电变压器套管主要采用复合瓷绝缘式，高压套管分导电杆式和穿缆式两种。

分接开关 为适应系统电压幅值在一定范围内变化的需要而进行配电变压器电压调整的装置。分接开关通常装于高压侧绕组上，通过调整高压绕组匝数来调整配电变压器的输出电压。调压方式分为有载调压和无载调压。

绝缘 配电变压器内导电体之间和导电体与地之间的介质结构。配电变压器的绝缘按能长期承受的工频工作电压，可能遭受的工频过电压、雷电过电压和操作过电压进行设计。油浸式配电变压器中主要的绝缘介质是变压器油和纤维绝缘纸，干式配电变压器中较多使用合成绝缘材料。

主要类型 按相数不同，可分为单相配电变压器和三相配电变压器，相对于三相配电变压器，单相配电变压器具有结构简单、节能，噪声低等优点。按绝缘介质不同，可分为油浸式配电变压器（见图 1 和图 2）、干式配电变压器（见图 3 和图 4）和 SF_6 气体绝缘配电变压器。按铁芯材质不同，可分为硅钢片铁芯配电变压器和非晶合金铁芯配电变压器。按安装位置不同，可分为室内配电变压器和室外配电变压器。按调压方式不同，可分为有载调压配电变压器和无载调压配电变压器。

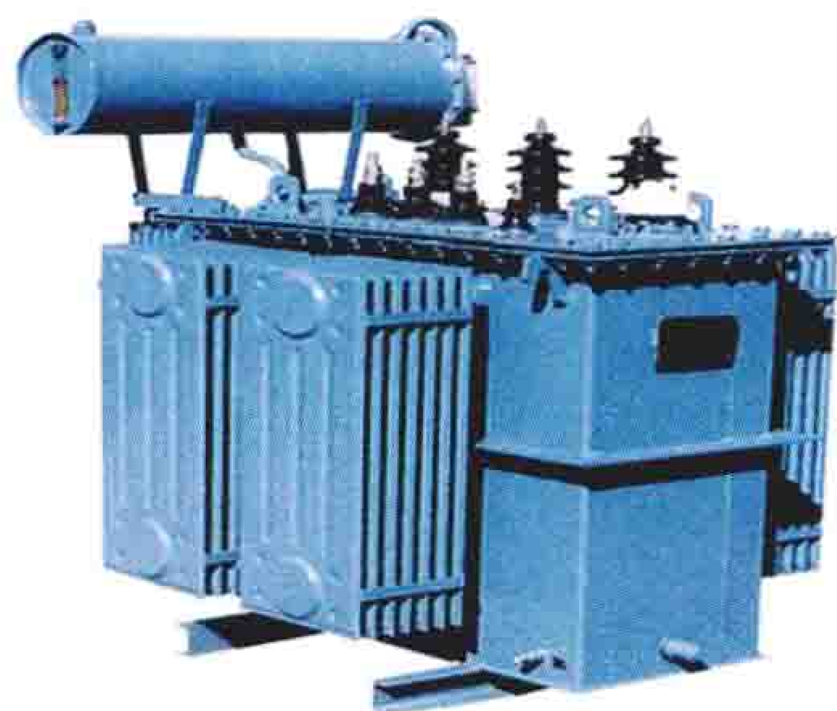

图 1 普通油浸式配电变压器


图 2 密封式油浸变压器

参数 主要有额定电压、额定电流、额定容量。此外，还有额定频率、绕组的联结组别、电压调整方式和范围、阻抗电压、空载电流、空载损耗、绝缘水平等。


图 3 环氧树脂浇注固体绝缘干式变压器

额定电压是单相变压器的绕组端子间或三相变压器与线路连接的端子间由铭牌所规定的电压值。额定电流是绕组的额定容量除以该绕组的额定电压及相应的相系数（单相为 1，三相为$\sqrt{3}$）所得的电流值。额定容量是视在功率的惯用值，为额定电压、额定电流和相应相系数的乘积。

损耗 变压器的损耗分空载损耗与负载损耗。空载损耗又称为不变损耗，它是变压器空载励磁时，铁芯片中产生的磁滞损耗和涡流损耗之和，也称为铁损。负载损耗是指变压器的负载电流在线圈中产生的电阻损耗和漏磁所产生的各种杂散损耗之和。负载损耗是随负载电流的变化而变化的，故又称之为可变损耗，亦称铜损。由于配电变压器用量很大，变压器铁损和铜损的大小直接影响配电网的电能损耗。


图 4 非包封空气绝缘干式变压器

发展 随着负荷密度的增长、城市环境发展需求的提升，配电变压器将有以下发展趋势：①低损耗，尤其是较低的空载损耗；②低噪声，尤其是空载噪声要低；③全密封，使变压器油不与外界空气接触，满足免维护要求；④推广使用共箱组合式配电变压器。

peidian bianyaqi zhongduan

配电变压器终端 （transformer terminal unit，TTU）

对中压配电网配电变压器进行监测的配电网自动化系统终端，简称配变终端。采集配电变压器低压侧和（或）高压侧数据，监测并记录其运行工况；此外，配备数字量输出，对当地的无功补偿设备和有载调压配电变压器的分接头进行

调节控制。

配电变压器终端（见图）的主要功能包括负荷与供电质量监测、故障检测、无功补偿控制、变压器有载调压控制等。负荷与供电质量监测包括数据采集、负荷记录、负荷统计、谐波测量、停电时间监测等功能。故障检测功能一般要求能够记录故障电流幅值与故障历时，该功能只针对个别工程设计要求。无功补偿控制功能指对配电变压器当地安装的无功补偿装置进行三相补偿、单相补偿和综合补偿控制，可以选择就地自动补偿控制方式，亦可接收配电网自动化系统主站下发的命令进行控制。具备有载调压的配电变压器，能够根据主站命令对配电变压器分接头进行调节控制。



典型的配电变压器终端

配变终端正常运行时由配电变压器低压侧直接供电，不配备蓄电池，通常在电源回路里设计一数值较大的储能电容，在系统停电时，维持变压器终端运行数秒的时间，保存记录数据，并向主站报告停电事件。

配变终端结构尺寸较小，通常在电容补偿柜或电能表箱中安装。

peidian dili xinxi xitong

配电地理信息系统 （distribution geographic information system） 采集、模拟、存储、处理、检索、分析和表达配电网地理空间数据的计算机系统，简称配电 GIS，又称自动绘图/设备管理/地理信息系统（AM/FM/GIS）。以配电网数字地图为背景，采用组件式 GIS 或 Web GIS 技术，在空间地理图形的基础上开展配电网图形数据资料和非图形参数的应用，通常涵盖配电网供电范围内的空间地理网络、道路网络、电气网络、地下电力管网、通信网络等方面的主要信息，为配电管理系统中的各自动化系统提供基于地理层、设备层、物理层、拓扑层的基础数据，为配电生产管理系统中的各种应用管理提供流程化的业务处理平台。

基本功能 包括数据录入、显示管理、查询统计及打印输出等功能。

数据录入 在市政测绘部门提供的城区数字地图的基础上，使用配电 GIS 平台提供的绘图工具，在背景地图上建模、录入架空配电线路、配电电缆线路、通信线路以及配电设备信息，并标明其地理位置及互相之间的拓扑关系。通常采用全球定位系统（GPS），标定其具体的坐标。此外，还要录入每一个设备的属性数据，包括生产厂家、出厂铭牌、编号、技术数据、投运日期、设备缺陷、检修记录、实物图片等基本档案管理信息；在系统投入运行后，通过人工录入或从配电网自动化系统获取反映设备运行工况的数据与信息。由于配电网的异动率较高，需要及时对配电网信息进行维护、更新，以保证其完整、准确地反映配电网现状。

显示管理 能对配电网地图进行任意比例的缩放、拖动和漫游，快速查找道路和门牌，如道路最短路径的寻找，距离的测量和面积的计算等。为了突出站所、线路及设备的走向和连接关系，采用分层显示的办法，将地理图分成不同的层，如分成街道图层、地上设备层、地下设备层等，在显示时去掉不需显示的部分（如消去房屋建筑，只保留街道图等）。

查询统计 通过人机界面，检索并显示出某一设备的坐标位置、所处的地理环境以及有关技术档案，对配电网中的各种信息进行多种方式的空间统计，如按线路或区域统计出其中的设备、容量、负荷等。

打印输出 打印、导出各种格式的视图文件。

系统构成 由相应的系统硬件和系统软件组成。

系统硬件 由 GIS 数据服务器、GIS 应用服务器、Web GIS 服务器、应用工作站以及相应的网络设备组成。GIS 数据服务器保存配电设备空间和属性数据；GIS 应用服务器提供数据抽取、空间分析、拓扑分析等高级应用服务；Web GIS 服务器提供地理图形与配电网络图形的信息发布，配电设备查询定位、统计分析、数据采集与监控系统（SCADA 系统）实时信息显示等；应用工作站包括 AM/FM 工作站、开发维护工作站等。

系统软件 由系统管理软件、GIS 基础软件平台、应用软件等部分组成。系统管理软件主要指计算机操作系统（如 Windows、Unix、Linux 等），关系到基础软件平台和应用软件语言使用的有效性；GIS 基础软件平台应用空间数据搜索引擎（SDE），将设备空间与属性数据存放在商用关系数据库里，实现统一的访问、管理；应用软件包括配电资源管理应用、开发维护应用等软件。

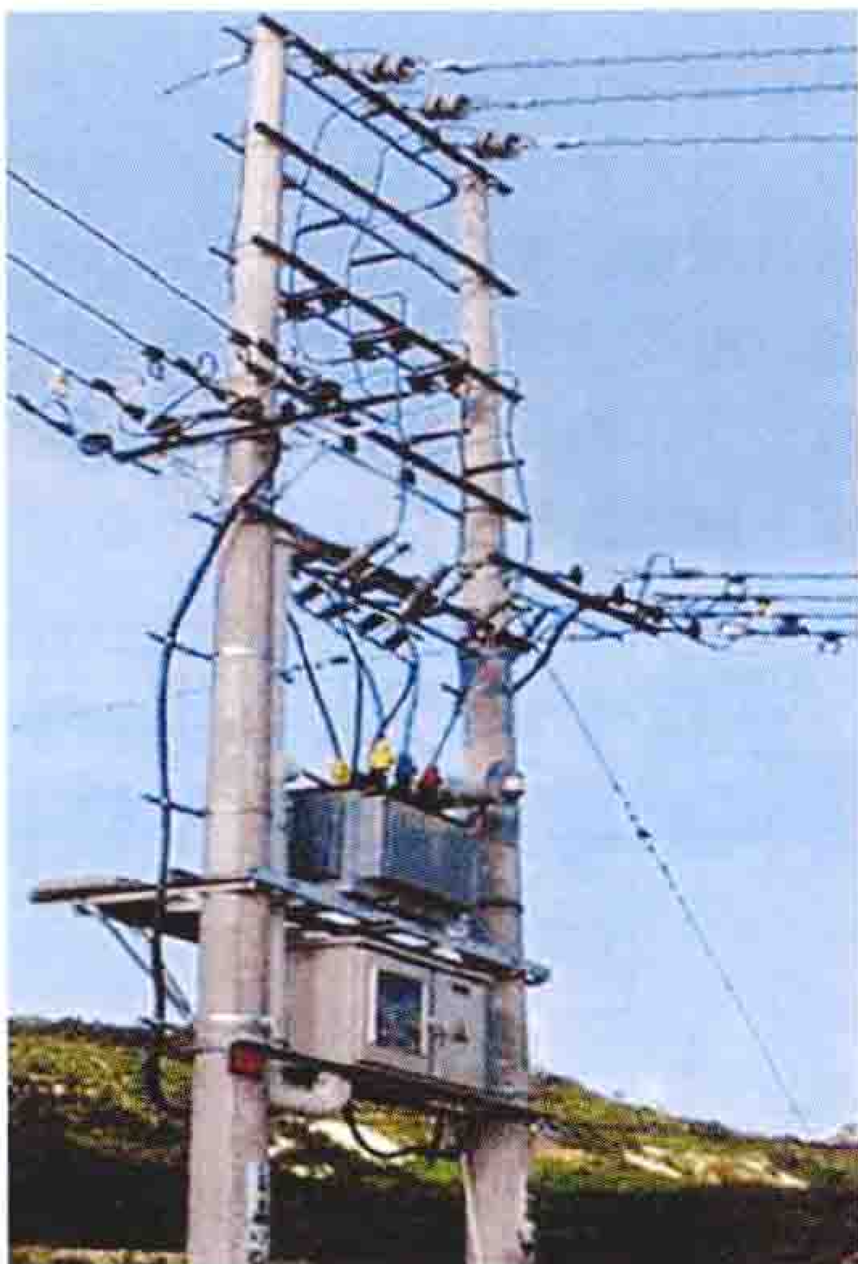
GIS 基础软件平台是用于 GIS 的建立和开发的通用软件系统，是一组具有 GIS 基本功能的软件包，又称 GIS 平台。配电 GIS 都是采用通用 GIS 平台开发的。在通用 GIS 平台基础上构建包括图形管理平台、图形服务平台、业务构建平台等的配电 GIS 平台，提供数据库访问、图形/图层操作显示、网络拓扑和数据操作的统一接口等功能，并且根据具体应用封装一系列配电设备对象。①图形管理平台是配电网资源图形管理的基础平台，用于实现地理走向图、电气联络图、拓扑关系、设备台账与各种专题图（电缆剖面、线路相序图等）的管理与维护。②图形服务平台包括分块地图、Web 地图、电气联络图、电网专题图、查询定位、空间分析、坐标转换以及其他定制服务。③业务构件平台包括构件运行管理、构件开发、构件管理三个平台与构件库，提供文件报表、任务消息、专业应用、基础业务等服务。构件指的是被封装的对象类、功能模块、文档等，它是一个可复用的软件模块，可被用来构造其他软件，提高软件开发效率与质量。

展望 配电 GIS 作为数字化配电网的一个重要技术支撑手段，是供电企业信息化发展的重要方向之一。随着配电 GIS 应用的普及与深入，配电 GIS 将向集成化发展，与全球定位系统（GPS）、遥感（RS）、支持决策系统（DSS）等结合，成为高度自动化、实时化和智能化的系统。

peidian diangan

配电电杆 （distribution line pole） 支撑配电线路及其设备部件的一种杆件。配电电杆要能承受配电线路及设备自身的重力载荷、风力载荷、不平衡载荷以及附加载荷等。配电线路的电杆大多采用钢筋混凝土电杆，市区也有使用自立式铁塔和锥形钢管杆的。图 1 所示为双杆支撑的配电变压器台架，图 2 所示为单杆支撑的单相配电变压器台架。

混凝土电杆　采用硅酸盐水泥、中粗沙和最大粒径不宜大于25mm的碎石、水按一定比例拌和，配以钢筋骨架，经过高速离心旋转、蒸汽养护等工艺制作而成，俗称水泥杆。其构造按钢筋的型号和受力情况等不同分为钢筋混凝土电杆（G）、预应力混凝土电杆（Y）和部分预应力混凝土电杆（BY）。钢筋混凝土电杆的混凝土强度等级不宜低于C40；预应力混凝土电杆、部分预应力混凝土电杆的混凝土强度等级不宜低于C50。


图1　双杆配电变压器台架

常用混凝土电杆的高度有8，9，10，12，13m和15m等，外形细长，呈圆锥形，梢径分别为ϕ150、ϕ190和ϕ230，锥度一般为1/75。


图2　单杆单相配电变压器台架

铁塔　由角钢或等径管型材料加工制作而成的电杆。角钢型铁塔由角钢经过加工冲孔拼接而成，包括主角钢、横材、斜材和辅材等；管型铁塔由管型材料在其两端各镶上一个法兰与其他管型材料连接构成整基铁塔。

铁塔在毛坯件加工完成后必须进行一次组装，不允许有扩孔、材料扭曲和强行拼装的现象发生，每块塔材上都有编号，镀锌层厚度均匀且符合要求，无滴漏、咬边、漏镀等现象。

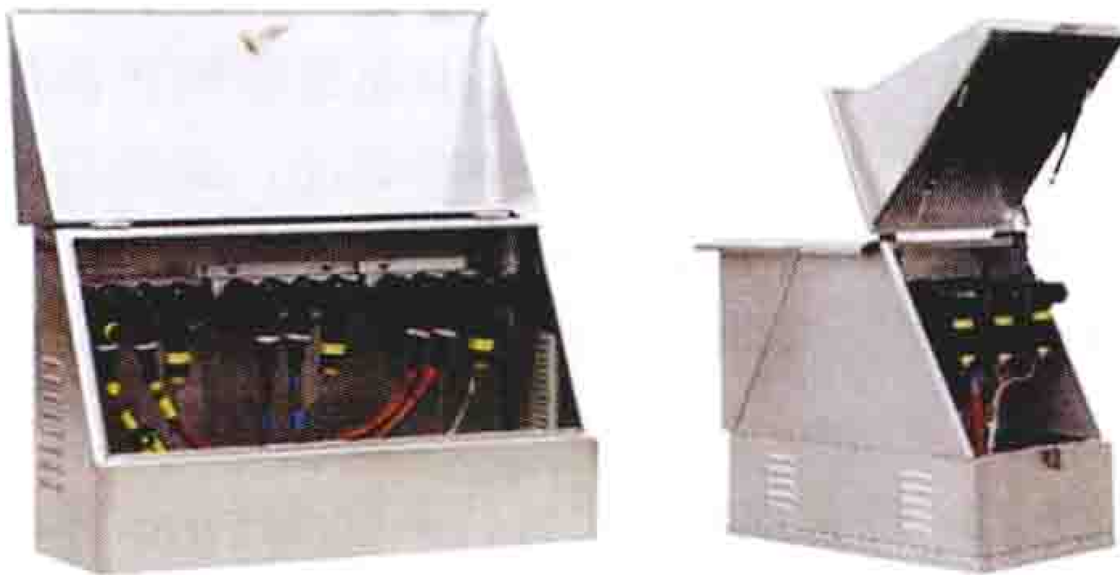
钢管杆　由钢板经过平整、开料、液压呈圆锥形、焊接、封头、镀锌、整形等多道生产环节加工而成。钢管杆须检查梢径、根径、长度、材料厚度、弯曲程度、焊接质量和镀锌情况等。配电钢管杆一般只由一节组成。

随着城市和乡村建设的不断发展，同塔多回的配电线路越来越多，钢管杆和窄基铁塔的使用也越来越多。由于其具有外形美观、能承受较大张力而无需拉线陪衬等优点，特别适用于狭窄道路、城市景观道路和无法安装拉线的地方架设。架空配电线路使用的钢管杆以圆形为主，主要是兼顾分支线路的连接。通常情况下转角、终端杆的锥度为1/65，梢径为190～230mm，也可以根据需要加工。

peidian dianlan fenzhixiang

配电电缆分支箱　(distribution cable dividing box)

用于连接两个以上配电电缆终端，完成配电电缆线路的汇集和分接功能的专用配电连接设备。主要用于电缆线路的配电网。其优点是结构紧凑、占地面积小、接线方式简单、安装维护方便。当任一电缆分支线路发生故障时，可在配电电缆分支箱内断开故障线路而恢复对其他电缆分支线路的供电，而且在配电电缆线路发生故障后，测寻故障点和修复故障线路比较灵活，能缩小故障测寻的范围和方便修复故障。图为户外电缆分支箱。


户外电缆分支箱

电缆终端是电缆分支箱的主要部件，通常采用可分离式终端或户内终端，如采用插拔式“L”型电缆终端、电缆终端头装有短路故障指示器等，带有熔断器或开关的配电电缆分支箱，在运行和发生故障时处理更为灵活方便。箱体内设专用接地导体。

配电电缆分支箱一般安装在户外，为防止箱内结露，箱内底面由密封材料铺平，箱体开设自然通风口，装设防雨檐。箱壳多采用不锈钢板、覆铝锌板或非金属复合材料，防护等级不小于IP33，具有防火、防尘、防潮、耐腐蚀、防盐雾、抗污染等特点，安装在城市人行道边或绿化带内，既美观又不需要油漆维护。

peidian dianlan guzhang cexun

配电电缆故障测寻　(distribution cable fault location)

利用测试仪器设备寻找电缆故障点的过程和方法。根据电缆故障的性质，先用故障测距的方法确定故障区段后，再用路径探测的方法确定电缆路径走向，最后用故障定点的方法确定故障点的位置。电缆故障测寻是配电网设备检修中重要的一项工作。

故障性质诊断　用仪表测量电缆绝缘变化程度和导体是否连续，以确定故障是绝缘损坏还是导体断线。只有确定了故障性质，才能选用合适的故障测距法和故障定点法（见表）。

配电电缆故障性质及测寻方法选择

故障性质	故障测距法	故障定点法
断线故障	低压脉冲反射法	声磁同步法
低阻故障	低压脉冲反射法/脉冲电流法	声磁同步法/感应法/电桥法
高阻故障	脉冲电流法/二次脉冲法	声磁同步法
闪络故障	脉冲电流法/二次脉冲法	声磁同步法

故障性质反映电缆绝缘损坏的程度和导体的断线情况。用绝缘电阻表测量电缆一相、多相对地或者相间的绝缘电阻，可确定高阻、低阻、金属性接地故障。少数情况下需进行直流耐压或者串联谐振实验，以发现封闭性故障（闪络故障）。用万用表测试电缆一相、多相导体的连续性，可确定一相断线、多相断线等情况。通常电缆故障主要是绝缘的损坏，也有同时烧断导体的现象。

故障测距 选用合适的仪器设备测量电缆故障点离测试点的距离的过程和方法。电缆一般较长且多数埋于地下，直接查找故障点十分困难，电缆故障测距能够大体确定故障所在的区段，降低故障测寻的难度，缩短故障测寻的时间。故障测距的方法主要有回路电桥平衡法、低压脉冲反射法、脉冲电压法、脉冲电流法和二次脉冲法5种。

回路电桥平衡法 利用直流电桥测量电缆故障点的距离的方法，简称电桥法。将被测电缆终端故障相与非故障相短接，电桥两臂分别接故障相与非故障相，调节电桥平衡后，根据故障电缆的长度与电阻成线性的关系，可以计算出故障点的距离。电桥法的原理示意如图1所示，故障点距离的计算公式为

$$L_x = 2L\frac{R_A}{R_A + R_B}$$

式中 L_x 为测试点至故障点的距离；L 为电缆全长；R_A、R_B 分别为电桥平衡后电桥变阻器的阻值。

电桥法的特点和要求：①只适用于测量电缆线路中的单点故障，如果线路中同时存在几个故障点，就不能应用；②电缆线路另一端的跨接线越短越好，其截面积应接近电缆导体的截面积，并紧固连接，使其接触电阻接近于零；③提高试验电压做高电阻接地故障测试时，必须特别注意安全问题。

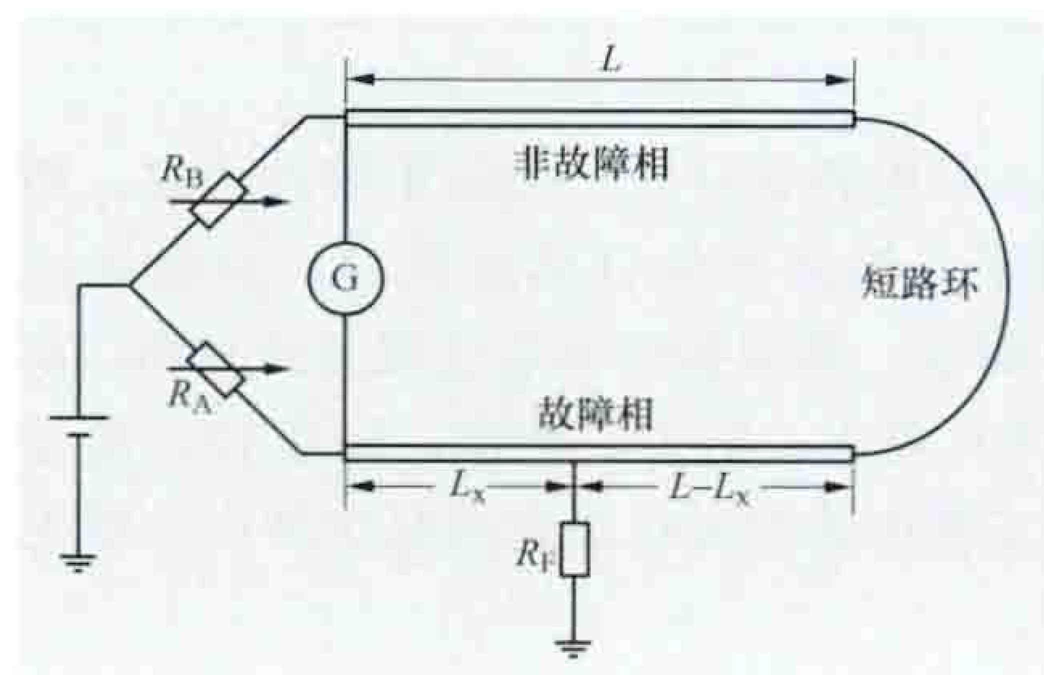


图1 电桥法原理示意图

用故障烧穿装置将闪络性故障转化为接地故障后，需立即用电桥法测量，以免绝缘恢复使故障点重新封闭。同时不要把故障的接地电阻烧得太低，以免故障定点时带来音量过小的困难。

低压脉冲反射法 利用脉冲反射原理测量电缆故障点距离的方法，简称脉冲法。用电缆故障测距仪向电缆注入低压脉冲信号，信号传播至故障点会发生反射，记录脉冲在测试点和故障点之间往返传播一次经历的时间，知道脉冲的传播速度可以计算故障点的距离。故障点距离的计算公式为

$$L_x = \frac{1}{2}v\Delta t$$

式中 L_x 为测试点至故障点的距离；v 为脉冲在电缆中的传播速度；Δt 为脉冲在测试点和故障点之间往返传播一次经历的时间。

脉冲法最适用于测寻断线故障，同时也适用于测寻接地电阻小于100Ω的低阻故障。

电缆故障测距仪的原理是利用高速数据采集技术采集脉冲反射信号，利用嵌入式处理器计算故障点的距离，最终从液晶显示器上显示出反射脉冲波形和以米为单位的故障点距离值。

脉冲电压法 利用故障点绝缘瞬时击穿产生的电压脉冲信号测量电缆故障点距离的方法。首先用直流高压信号发生器对电缆故障相施加直流高压或者冲击高压，造成故障点绝缘击穿，然后用电缆故障测距仪通过电阻或者电容分压器采集电缆上的电压脉冲信号，根据脉冲在测试点和故障点之间往返传播一次经历的时间，知道脉冲的传播速度以计算故障点的距离。脉冲电压法测试速度快，但安全性差、脉冲电压波形较难分辨，此方法已基本不用。

脉冲电流法 利用故障点绝缘瞬时击穿产生的电流脉冲信号测量电缆故障点距离的方法。首先用直流高压信号发生器对电缆故障相施加直流高压或者冲击高压，造成故障点绝缘击穿，然后用电缆故障测距仪通过线性电流耦合器采集电缆上的电流脉冲信号，根据脉冲在测试点和故障点之间往返传播一次经历的时间，知道脉冲的传播速度可以计算故障点的距离。脉冲电流法的接线示意如图2所示。脉冲电流法测故障时不需事先将高阻故障烧穿，测试速度快，采用线性电流耦合器采集电缆中的电流脉冲信号，接线安全简单，脉冲电流波形容易分辨，故该方法被广泛采用。

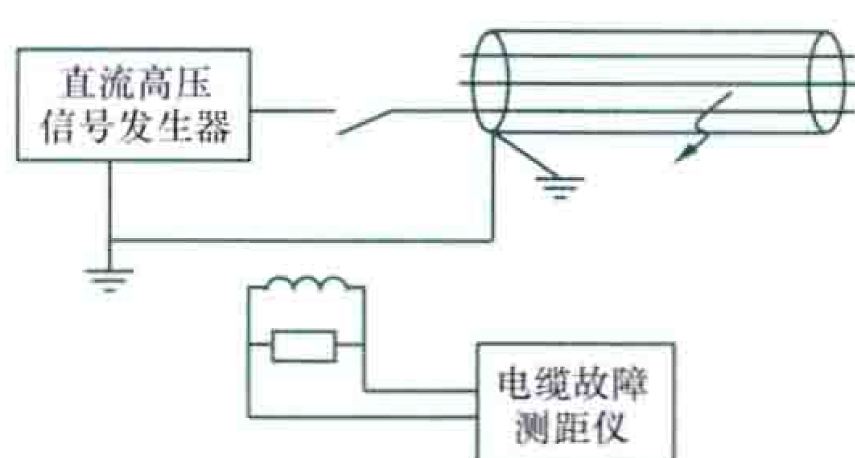


图2 脉冲电流法接线示意图

二次脉冲法 利用两次脉冲反射测试过程测量电缆故障点距离的方法。主要用于高阻故障和闪络故障。首先用电缆故障测距仪进行一次脉冲法测试，获得电缆全长脉冲反射波形。然后用直流高压信号发生器通过串联电阻对电缆故障相施加冲击高压，造成故障点绝缘击穿，产生直流电弧放电。在电弧放电过程中，用电缆故障测距仪进行第二次脉冲法测试，获得电缆短路故障脉冲反射波形。最后将两次波形比较显示，根据波形的分叉点可以确定故障点的位置，进而计算出故障点的距离。

二次脉冲法需要准确选择第二次脉冲发送的时刻，同时利用二次脉冲耦合器实现低压脉冲信号的耦合和电缆故障测距仪的高压保护。二次脉冲法的接线示意如图3所示。二次脉冲法波形直观，操作简单，容易分辨故障点，操作人员几乎不需要培训就能使用。

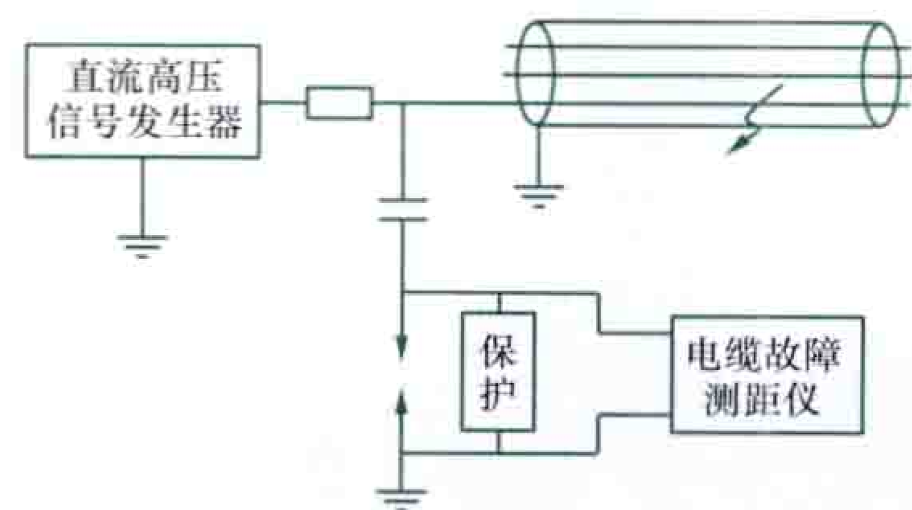


图3 二次脉冲法接线示意图

路径探测 利用仪器设备找出电缆路径走向的过程和方法。电缆多数埋于地下，在电缆线路资料不全时，不易明确判断电缆路径，故电缆故障测距后，需要进行路径探测。探测电缆路径主要有音频感应法和脉冲磁场法两种。

音频感应法 向被测电缆注入音频信号电流，利用接收线圈在地面上接收磁场信号，随着接收线圈的移动判断出电缆路径。

脉冲磁场法 向电缆芯和地之间施加冲击高压脉冲，利用接收线圈在地面上接收脉冲磁场信号，当接收线圈由电缆的一侧移到电缆的另一侧时，测量到的脉冲磁场的初始极性相反，故可识别出要寻找的电缆。

故障定点 利用测试仪器设备证实电缆故障点的过程和方法。电缆故障测距不可避免地存在测量误差，一般很难根据测距结果从地面上直接找到故障点，因此故障测距后还需做进一步的故障定点。故障定点主要有声测法、感应法和声磁同步法3种。

声测法　用直流高压信号发生器对故障电缆芯定时放电，这时在故障点处形成机械振动和放电声音。在地面上可用传感器接收这种音响。根据初测区段放电声的音量大小，音量最大的即是故障点的精确位置。声测法只适用于低电阻接地的电缆故障，对金属性接地的故障效果不佳。

感应法　在故障电缆芯上输入一个音频信号，由于电缆线芯的扭绞效应，在电缆故障点前接收到的时起时伏的感应信号比在电缆故障点后接收到的感应信号幅度要强得多，从而找出故障点。感应法适用于金属性接地故障和相间短路故障。

声磁同步法　用直流高压信号发生器对故障电缆芯定时放电，这时在故障点处形成机械振动和放电声音，同时在电缆路径上方形成交变电磁场。在地面上可用传感器接收声音和电磁场信号。根据声磁信号到达测试点的时间差可以判断故障点的远近，声磁信号时间差最小的即是故障点的精确位置。声磁同步法的原理示意如图4所示。声磁同步法提高了仪器抗环境噪声干扰的能力，通过比较在电缆两侧接收到磁场信号的初始极性，还可以在故障定点的同时探测电缆路径。

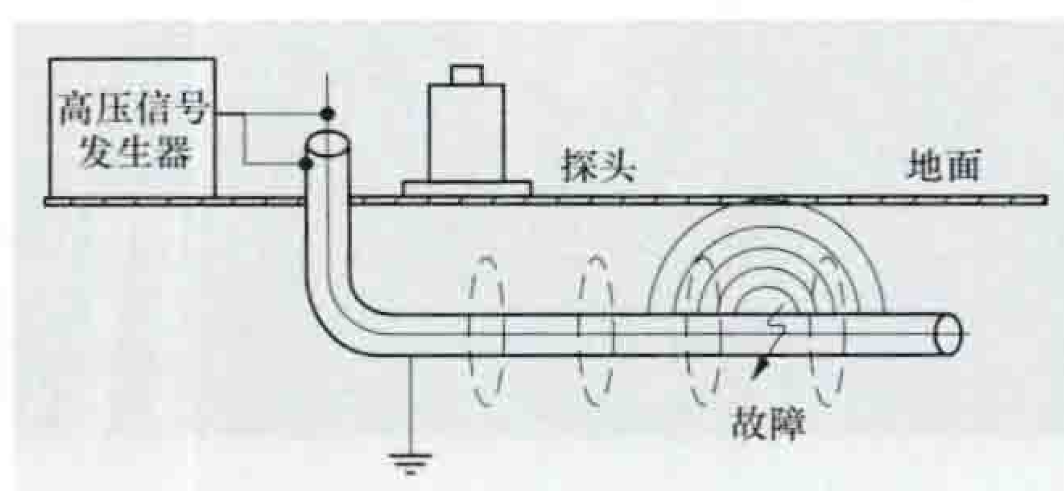


图4　声磁同步法原理示意图

参考书目

徐丙垠，李胜祥，陈宗军．电力电缆故障探测技术．北京：机械工业出版社，1999.

peidian dianlan jietou

配电电缆接头

(distribution cable joint)　配电电缆线路中的终端和中间接头等电缆附件。按所用材料不同，可分为热缩电缆接头、冷缩电缆接头和预制电缆接头等。

配电电缆终端　安装在电缆末端，并保持绝缘至连接点的装置。装设电缆终端时，要将电缆金属套剥开，使绝缘线芯的导体和过渡金具（如出线梗）连接至其他电气设备，然后再恢复绝缘和防止水分侵入的密封性能。因此，电缆终端的制作和安装一般均在电缆安装现场完成。电缆终端是电缆线路的一个薄弱环节，电缆终端处发生的事故占电缆线路总事故的70%左右，多数是由密封不完善、接地处理不当等引起。同时因配电电缆终端位于电缆线路末端，在配电系统出现内、外过电压时，侵入波能在末端反射叠加，因此要求配电电缆终端的绝缘不低于电缆本体的绝缘水平。电缆终端绝缘按在密封套之内和之外，分为内绝缘和外绝缘。密封套常以金属壳体、瓷或环氧套等组装而成，壳体内所用绝缘材料和电缆本体不同，几何形状各异，因此产生了轴向应力。为了缓和内绝缘的集中应力，10kV及以上电压等级的电缆终端都装有电缆应力锥或应力管。外绝缘一般受气候环境的影响，不但要满足电气距离的要求，且需按环境污、湿特征和污秽等级以及海拔等因素适当加强绝缘。电缆终端的内、外绝缘相互配合达到终端绝缘的要求。

配电电缆中间接头　连接电缆与电缆的导体、绝缘、屏蔽层和保护层，以使电缆线路连续的装置。对其基本要求是：把电缆的主要组成部分，包括导体、导体屏蔽、绝缘层、绝缘屏蔽、金属套、钢丝铠装等都要连接起来，电缆导体在连接处应有良好的导电性能和机械性能，并具有与电缆本身相同的绝缘强度和防潮性能，其密封套还应具有防腐蚀性能。

电缆的导体之间通常用相当于导体外径4倍长的连接管连接，连接管的截面积等效于导体的截面积。所有导体连接都要求连接管长度内的电阻不大于同长度导体的电阻，且抗张强度一般不低于导体的50%。

因导体连接管外径大于导体直径，接头内的复合绝缘厚度和电缆绝缘厚度不同，这就使得接头产生了轴向应力，除低压电缆接头外，高压电缆接头需考虑绝缘设计。

peidian dianlan xianlu

配电电缆线路

(distribution cable line)　采用电力电缆配送电能的配电线路。配电电缆线路一般敷设在地下，少数采用架空敷设、桥（架）梁敷设或水下敷设等。常用的地下敷设方式有直埋敷设、电缆沟敷设、隧道敷设、排管敷设等。

线路构成　配电电缆线路主要由配电电力电缆、配电电缆接头及其相应的附属设施，如电缆沟、电缆排管、电缆工作井、电缆隧道、电缆竖井、电缆桥梁（架）等构成。

线路路径　配电电缆线路路径需结合城市总体规划，与各种管线和其他市政设施统一安排，且应征得城市规划部门的认可。应综合考虑路径长度、施工运行和维修方便等因素，统筹兼顾，做到经济、合理、适用。相应的附属设施宜按电网远景规划并预留适当裕度一次建成。

适用范围　①架空配电线路走廊在技术上难以解决的地区；②城市繁华地区及对市容有较高要求的地区；③重点风景旅游区；④对架空线路腐蚀严重的特殊地区。

阻燃和防火　一般规定敷设在防火重要部位的电力电缆，应选用阻燃电缆，而对电缆着火可能导致严重事故的回路、易受外部影响波及火灾的电缆密集场所，应根据现场实际采取阻火分隔封堵、安装火灾监控报警和设置固定灭火装置等措施。

防腐蚀和防水　常用的方法是在电缆铠装用钢带（钢丝）上涂抹防腐材料，也可以使用改性沥青材料，将其匀称地涂抹在电缆外护层及护套中间，使电缆具备防腐蚀和防水性能。在进行电缆敷设时，应认真调查周围环境，绕开水汽和潮气多的地段，必须在水汽及潮气多的地段敷设时，应该使用具备纵向及横向阻水结构的阻水电缆，其内部及外护层多使用聚乙烯材料。

peidian dianlan xianlu sheji

配电电缆线路设计

(distribution cable line design)

对配电线路的电力电缆合理选型、电缆敷设方式等进行研究，在优选路径后作出设计并形成设计文件和图纸，它是配电电缆线路施工的依据。电缆线路工程的造价远大于架空线路，且改动的灵活性不如架空线路，因此，电缆线路设计不但要满足近期计划，尤其要符合远景规划的要求。配电电缆线路设计必须以设计标准为依据，包括电缆线路路径选择、电缆敷设方式、电缆选型等。

设计标准　各国的电力行业都各自制定了电缆线路设计标准。在中国，主要有GB 50217《电力工程电缆设计规范》

和 DL/T 5221《城市电力电缆线路设计技术规定》。

路径选择　配电电缆线路路径应与城市总体规划相结合，与城市各种管线和其他市政设施统筹安排，且征得城市规划部门批准认可。电缆敷设路径应综合考虑路径长度、施工、运行和维修等方面因素，做到经济合理，安全适用。供敷设电缆用的土建设施宜按电网远景规划并预留适当裕度一次建成，电力电缆相互之间允许最小间距以及与其他管线、构筑物基础等最小允许间距必须满足相关的技术标准。

配电电缆线路的路径选择常取决于道路的路面和路基的种类。此外，城市中的各种地下管线较多，如水管、煤气管、电话电缆等，要考虑彼此间的相互关系。为了便于安装和日后维修，要求路面容易开挖并能承受一定的载重，人行道路面是最佳选择。城市地下管线通常布置为一侧人行道下是电力电缆、自来水管，另一侧为电话电缆和煤气管道走廊，以防止相互影响。最理想的电缆线路的路基是沉积层或沙土层，不选择岩石、河洪地段，防止路基不均匀沉降对电缆线路造成影响。

敷设方式　根据电压等级、电缆数量、施工条件及初期投资等因素确定。通常采取直埋敷设、电缆沟敷设和排管敷设，此外，根据现场情况，电缆的敷设方式还有电缆桥梁敷设、竖井敷设、隧道敷设和水底电缆敷设等。电缆直埋敷设适用于在电缆线路不太密集和交通不太频繁的城市地下走廊，不需要前期土建工程，埋设深度要求为电缆表面距地面不应小于 70cm，是一种较经济的敷设方式。电缆沟敷设适用于不能直接埋入地下且无机动车负载的人行道、变电站内、厂区内等处，一般沟深在 0.6～1.5m 之间。每 50m 左右设一集水坑，沟中可用 40×5mm^2 扁钢组成接地网。电缆排管敷设适用于电缆条数较多，且有机动车等重载的地段，如市区街道、穿越小型建筑物等。

配电电缆选型　主要是对其型号和规格、导体材料和截面、绝缘种类和护层种类等的选择。对配电电缆线路，主要按负荷电流和电缆导体的长期允许温度选择其截面。如电缆线路较长，除了按负荷电流选择截面外，还要校核该负荷电流产生的电压降是否在允许范围内，如超出允许范围，则选择高一档的截面。

早期通常选择油浸纸绝缘电缆，由于有淌油等缺点，现已基本由挤包绝缘电缆取代。（见配电电力电缆）

绝缘种类的确定：①低压配电线路用电缆。一般采用聚氯乙烯电缆和交联聚乙烯电缆。聚氯乙烯电缆在起火燃烧时会产生大量黑色烟雾和氯化氢等强腐蚀性气体，给消防工作带来困难，并造成严重的二次性灾害，故在火电厂、核电站、石油平台、高层建筑、公共场所和船舶上不宜采用，一般在直埋敷设时选用。硅烷交联聚乙烯电缆的制造工艺和性能有了很大的提高，成本也在逐步降低，因此应尽可能选用硅烷交联聚乙烯电缆。②中压配电线路用电缆。首选交联聚乙烯电缆，也可采用乙丙橡胶电缆。与交联聚乙烯电缆相似，乙丙橡胶电缆不但电性能和热性能都比较好，而且柔软性、耐 X 射线辐照和抗水树枝性能好，因此适宜在矿井、水下和核电站内使用。其缺点是价格较贵、介质损耗因数较大。

在易受腐蚀的环境中或在地下直埋敷设时，采用钢带外有外护套的电缆；在水下敷设的电缆会受到较大拉力时，一般采用钢丝铠装电缆。

peidian dianlan xianlu shigong

配电电缆线路施工　(distribution cable line construction)

按照配电电缆线路设计图纸和工艺规范对配电电缆线路进行电缆管沟施工、敷设电缆、电缆接头制作以及电缆线路交接试验等工作。市政地下综合管线错综复杂、纵横交叉，因此，配电电缆线路的施工是一项复杂的工程，施工时必须做好相关工作。图示为武汉最长电缆隧道施工现场。



武汉最长电缆隧道施工现场（宗关变电站—舵落口变电站，全长 1.26km，直径 2.5m）

电缆管沟施工　包括确认管沟位置、电缆沟排水、电缆沟支架及电缆管排的施工。①确认管沟位置的正确性。要求设计人员现场放样，指定管线桩位、标高等事项，严格按市政规划管理部门批复的管位实施，同时将放样的桩位、标高等事项形成书面文档记录在案。②电缆沟的排水。纵向排水坡度不宜小于 0.3%，沿排水方向在标高最低部位宜设集水坑。③电缆沟支架的施工。沟内的立柱和支架如系型钢制作，应采用热浸镀锌工艺；立柱和支架须与接地网连成一体，且接地电阻不允许大于 10Ω。④电缆排管的施工。管子的材质可选物理化学性能稳定，具有一定机械强度且对电缆外护套无腐蚀、遇电弧不延燃、非磁性的材料。

敷设电缆　①敷设施工前应履行相关施工手续。②确认相关土建设施具备敷设施工条件。③编制电缆敷设施工大纲，包括施工组织设计、施工计划和敷设施工作业指导书。④根据具体敷设方式准备相应的敷设专用工器具、设备和运输机械。⑤按设计确定的管沟敷设展放电缆。

电缆接头制作　电缆接头是安装在电缆与电缆之间，具有一定绝缘和密封性能，使两根及以上电缆导体连通，使之形成连续电路的装置。电缆终端是安装在电缆线路末端，使电缆与电力系统其他电气设备相连接，并保持绝缘与密封性能至连接点的位置。电缆终端和接头的选择应符合优良的电气绝缘性能。终端和接头的额定电压应不低于电缆的额定电压，其雷电冲击耐受电压，即基本绝缘水平应与电缆相同。电缆终端和接头的结构应符合电缆绝缘类型的特点，使电缆的导体、绝缘、屏蔽和护层分别得到延续，并力求安装与维护方便；应满足安装环境对其机械强度与密封性能的要求。电缆终端的结构形式与电缆所连接的电气设备的特点必须相适应，户外终端应具有足够的泄漏比距、抗电蚀与耐污闪的性能。

电缆线路交接试验 主要有耐压试验、泄漏电流试验和核相试验，按照电缆结构和电缆线路的重要性，有时还需增加其他试验，如导体的直流电阻试验、绝缘电阻试验、参数试验等。

耐压试验 在等于或高于运行电压下对电缆绝缘工作强度进行的电压试验，用以发现敷设电缆过程由于施工不当给电缆造成的机械和绝缘的损伤，或在制作电缆接头、电缆终端时由于安装工艺或材料等问题造成的质量不合格现象。耐压试验的试验电压按电缆运行电压的不同，常以相间电压的3～6.7倍直流电压，逐相试验5～15min，电缆线路运行电压越高，绝缘裕度越低，试验电压倍数相应较小。挤包绝缘电缆在直流试验电压的作用下，其绝缘会产生积累的损坏而影响使用寿命，因此它的直流试验电压较油浸纸绝缘的低，但因较低的试验电压不易查出电缆的缺陷，所以高压挤包绝缘电缆有时也用交流系统运行电压进行耐压试验。金属套或外屏蔽层对地有绝缘要求的电缆线路，如金属套单点接地或交叉互联的电缆线路，也用直流高电压对外护套进行耐压试验。

泄漏电流试验 测量电缆线路在试验电压时的泄漏电流值。试验时，将试验电压逐渐升高，根据其相应的泄漏电流与耐压试验前后的泄漏电流的比值，判断电缆线路的绝缘是否正常。

泄漏电流包括电缆线路绝缘内部的吸收电流及导电电流和电缆终端表面的外部漏电电流。常在电缆线路的两端各装上屏蔽护环，以获得电缆线路内部绝缘的泄漏电流值。

核相试验 核对电缆线路两端相位的一致性试验，防止电缆线路在并入系统投入运行时发生相间短路事故或造成受电端相序错误。核相试验兼有对电缆线路导体的连续性校核的作用。

直流电阻试验 用来测量电缆线路每相导体的直流电阻值，用以判断电缆导体间的电气连接是否良好。

绝缘电阻试验 测量电缆线路每相缆芯绝缘电阻值的试验。电压较低或较短的不重要电缆线路，可以绝缘电阻试验代替耐压试验。同时在耐压试验的前后，也做绝缘电阻试验，以判断电缆线路绝缘在耐压试验前后的变化，兼有保护耐压试验设备在电缆绝缘突然击穿时不被损坏的作用。

参数试验 测量电缆线路的交流电阻、电容值和损耗功率，由此计算得正、负和零序阻抗的试验。用作电力系统短路电流的计算和整定继电保护的定值，电缆线路电容值是经消弧线圈接地系统计算补偿量的依据之一，该系统内的电缆在投运前必须测量其电容值。

peidian dianli dianlan

配电电力电缆 (distribution power cable)

配电线路中外包绝缘和保护层的导线。配电电力电缆主要用于地下或水下的配电线路中，大都包有金属外皮并加以接地，也有不包金属外皮的，如低压橡塑电缆。配电电力电缆（见图）一般为多芯电缆，有两芯、三芯、四芯、五芯等。按绝缘材料的不同，配电电力电缆可分为油浸纸绝缘电缆、挤包绝缘电缆和压力电缆三大类。

油浸纸绝缘电缆 用纸带绕包在导体上经过真空干燥后，浸渍矿物油作为绝缘层，在其上再挤包金属套的电力电缆。油浸纸绝缘的电性能非常稳定，有的油浸纸绝缘电缆运行了70多年，仍在使用。油浸纸绝缘电缆可分成黏性浸渍纸绝缘电缆和不滴流浸渍纸绝缘电缆两种，这两类电缆结构完全相同，仅制造过程中的浸渍工艺不同。不滴流浸渍纸绝缘电缆黏度大，在工作温度下不滴流，能满足高差较大的环境使用。而按不同的结构，这两种电缆又都可分为统包油浸纸绝缘电缆、分相屏蔽和分相铅包电缆。



1kV交联聚乙烯绝缘钢带铠装电力电缆

统包油浸纸绝缘电缆又称带绝缘电缆。其结构特点是在每相导体上分别绕包部分绝缘带后，加适当填料绞合成缆，再绕包带绝缘，以补充其各相导体对地绝缘厚度，然后挤包金属护套。统包油浸纸绝缘电缆结构紧凑，节约原材料，价格较低，缺点是内部电场分布很不均匀，电力线不是径向分布，具有沿着纸面的切向向量，这类电缆又叫非径向电场型电缆。由于油纸的切向绝缘强度只有径向绝缘强度的1/10～1/2，所以统包油浸纸绝缘电缆容易产生移滑放电，只能用于10kV及以下电压等级。

分相屏蔽电缆和分相铅包电缆的结构基本相同，其特点是在每相绝缘芯制好后，包覆屏蔽层或挤包铅套，然后再成缆。

挤包绝缘电缆 又称固体挤压聚合电缆，它是以热塑性或热固性材料挤包形成绝缘的电缆。挤包绝缘电缆有聚氯乙烯（PVC）电缆、聚乙烯（PE）电缆、交联聚乙烯（XLPE）电缆和乙丙橡胶（ERP）电缆等。交联聚乙烯电缆是20世纪60年代以后技术发展最快的电缆品种，与其他电缆相比，具有制造周期短、效率高、安装工艺简便、导体工作温度高等特点。（见聚氯乙烯电缆、交联聚乙烯电缆）

压力电缆 在电缆中充以能流动，并具有一定压力的绝缘油或气体的电缆。在制造和运行过程中，油浸纸绝缘电缆的纸层间不可避免地会产生气隙，气隙在电场强度较高时，会出现游离放电，最终导致绝缘层击穿。压力电缆的绝缘处在一定压力（油压或气压）下，抑制了绝缘层中形成气隙，使电缆绝缘工作场强明显提高，可用于63kV及以上电压等级的电缆线路。

发展及趋势 1914年M.霍赫施泰德（M. Hchstadter）创造了屏蔽型电缆；1914年邓希思（Dunsheath）发展了分铅型电缆；1917年L.埃曼努埃利（L. Emanueli）发明了充油电缆；1931年贝内特（Bennett）首创了钢管充油电缆；1933年C.J.比弗（C.J. Beaver）试验成功了132kV充气电缆；1944年英国敷设了第一根3kV聚乙烯电缆。

挤包绝缘电缆由于没有淌油等缺点，已基本取代油浸纸绝缘电缆，同时挤包绝缘电缆也无需如压力电缆那样需要用油或气填充或压缩纸层间气隙，因此，挤包绝缘电缆经过不断改进，也有替代压力电缆的趋势。

peidian guanli xitong

配电管理系统 (distribution management system, DMS)

实现配电网运行与管理自动化功能的计算机系统。将配

电网的实时运行、电网结构、设备以及地理图形等信息集成，通过开放式平台与能量管理系统（EMS）和用电信息采集系统、营销业务应用系统交互信息，实现配电网运行监控及管理的自动化、信息化，以提高供电质量、运行效率与管理水平，改进用户满意度。

基本功能 包括配电网运行自动化功能和管理自动化功能两个方面。运行控制与生产管理这两项业务之间有大量的信息需要共享，前者需要从后者获取配电设备属性、网络拓扑数据，以保证数据源的唯一，避免重复录入；后者需要从前者获取配电网实时运行数据与故障数据，以完成停电、作业、检修等生产管理功能。

运行自动化功能 主要包括数据采集与监控（见配电网数据采集与监控系统）、自动故障定位、隔离与恢复供电（见馈线自动化）、电压与无功控制（见配电网无功功率与电压控制）、负荷管理等运行控制功能。负荷管理功能监视用户电力负荷状况，并利用降压减载、对可控负荷周期性投切、事故情况下拉路限电等三种控制方式进行削峰、填谷、错峰，改变系统负荷曲线的形状，以提高电力设备利用率，降低供电成本；负荷管理涉及变电、配电和用电三个环节，配电管理系统中的负荷管理功能主要针对配电环节。

管理自动化功能 主要包括设备管理、停电管理、作业（工作票、操作票）管理、检修管理等生产管理功能。（见配电生产管理系统、停电管理系统）

系统构成 由配电网运行自动化系统和配电网管理自动化系统两个子系统构成，包括紧密集成方式和松耦合方式两种构成方式。紧密集成方式指建设集运行控制与生产管理功能于一体的DMS主站。松耦合方式则是单独建设配电网运行自动化系统和配电网管理自动化系统，两个系统之间通过物理隔离装置交换数据。中国通常采用松耦合方式。此外，DMS还需要与能量管理系统（EMS）、自动读表（AMR）系统、客户信息系统（CIS）、电话呼叫管理（TCM，中国称95598）系统、负荷管理（LM）系统等用电管理系统交换数据。（见配电自动化系统集成）

展望 配电管理系统需要与其他相关自动化系统交互信息，以更好地完成配电网运行控制与生产管理功能，并为其他业务系统提供数据支持。为使不同的自动化系统以及应用模块之间能够方便地互通互联，其发展方向是建设基于IEC 61970、IEC 61968、IEC 61850标准的企业信息集成总线，实现各种自动化系统的无缝集成。另外，随着分布式电源的大量接入，配电网将变成一个分布式电源高度渗透、功率双向流动的有源网络，需要将配电网实时运行与离线管理数据高度融合、深度集成，实现分布式电源的优化调度管理。

peidian shengchan guanli xitong

配电生产管理系统 （distribution production management system，DPMS） 用于配电网生产管理的计算机应用系统。以配电地理信息系统（配电GIS）为基础平台，通过该平台组件提供的图层操作功能，读写配电GIS数据库中的图层与图形数据配置信息，再由配电GIS基础应用平台提供图形的显示功能显示地理背景图层及各种配电设备，在此基础上建立全面的设备、运行、评价体系和相关业务流程，实现设备及生产运行的全过程管理。

主要功能 包括设备管理、停电管理、两票管理、检修管理、车辆调度管理等功能。

设备管理 见配电地理信息系统。

停电管理 见停电管理系统。

两票管理 对工作票和操作票进行计算机管理。根据调度指令自动生成两票，并进行网上传递、签名。两票管理基于地理图或电气接线图进行全闭环自动管理，提供新增、修改、删除、打印和查询统计功能。在流程中采用严格的管理权限，设置各类两票许可人、签发人、审核人等相关权限。

检修管理 对检修方案、检修过程、检修记录等检修工作进行计算机管理。在对配电设备档案管理的基础上，提供检修管理功能。首先分析设备资料以及运行工况信息，对配电设备的运行状态进行动态跟踪诊断，根据各种配电设备的检修方针，在规定的技术指标超限时发出检修警报，确定具体的检修项目以及进行哪一等级的检修。然后针对每一项检修内容，制定出科学的检修方案，给出具体的检修工作票和倒闸操作票，列出需要的检修材料、人工及资金预算等，并提出安全注意事项，下达用户停电通知。在设备检修后，及时更新系统存储的设备状态资料。

车辆调度管理 对生产车辆的实时信息、调度进行计算机管理。①位置管理。包括车辆定位、车辆信息汇总、定位跟踪、行驶轨迹回放等方面。②车辆调度。实现用车申请、申请批复、调度车辆、派车候班、归还车辆等一系列派车流程的管理。③费用管理。对车辆运行中产生的费用进行记录、统计和管理。④资料管理。对车辆资料进行管理，包括车辆的基本信息资料和车载移动终端配置信息资料。

系统构成 以配电GIS为基础平台，在此基础上增加用于生产管理应用的工作站，开发配电生产管理应用软件，形成与配电GIS一体化的配电生产管理系统。有的配电生产管理系统是单独建设的，由服务器、工作站和相应的网络设备和操作系统、数据管理软件及配电生产管理应用软件构成，系统通过开放式平台接口与配电GIS交互信息，实现各类配电生产管理业务的GIS应用。

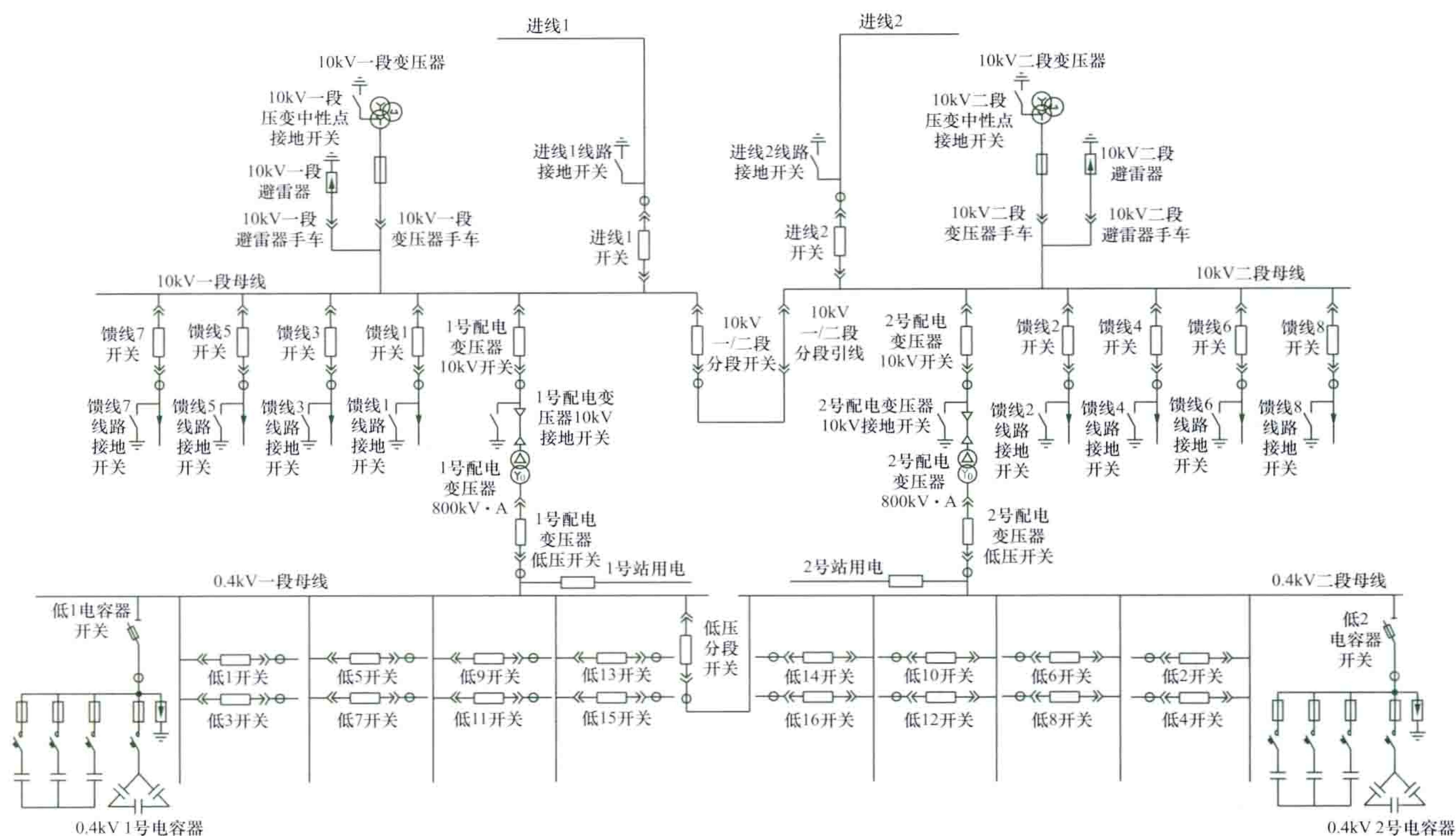
配电生产管理应用软件包括生产管理、规划设计管理、综合分析软件。生产管理软件包括停电管理、两票管理、检修管理、车辆调度管理等应用。规划设计管理实现配电网规划设计辅助决策。综合分析应用软件包括供电可靠性、电能质量、线损的统计分析等。

工作原理 将生产管理业务对象进行分类编码，采用具备唯一性、稳定性、适应性、扩展性、易用性的统一设备编码规范、设备参数规范、数据编码规范来统一规范配电业务的信息标准，同时通过对配电生产管理的业务流、信息流的整合，实现与相关自动化系统的信息交互，统一配电生产业务中的业务流程、业务规范、数据模型，确保配电生产管理系统信息在配电生产业务全过程中的处理与交换，构成高效的配电生产管理公共业务支撑平台，实现对生产业务流程的有效控制和优化管理。

peidiansuo

配电所 （secondary） 变电站母线的延伸，以满足特定地区中压配电的需要，或兼有将中压配电电压降至低压配电电压的功能。配电所用于解决变电站出线走廊受限、转供负荷不灵活、受电端电压质量降低等问题，实现转供负荷、提高供电可靠性及改善供电质量、就近低压配电等目标。不配置配电变压器的配电所即为开闭所，而仅将中压配电电压降至低压配电电压功能的配电所即为配变站。配电所典型接线如图所示。

构成 配电所一般由配电变压器、开关设备、二次设备及补偿装置组成。配电变压器一般优先选用高效、低能耗、低噪声变压器，容量根据就近负荷情况选定，不宜过大，以满足电压质量、降低低压线路损耗的要求。开关设备一般采用中压开关柜、环网开关柜及低压开关柜，开关柜通常配置断路器，环网开关柜通常配置负荷开关。二次设备是指对开关设备配置的继电保护、通信、自动化及计算机监控系统。补偿装置一般采用静止无功补偿装置，低压补偿方式。



配电所典型接线

分类及特点 配电所按其结构形式不同，可分为屋内式和箱式。屋内式配电所按其建筑物的不同又分为独立式及依附式。独立式配电所是指配电所的建筑物不与其他建筑物合用，是独立建筑物；依附式配电所则是指配电所的建筑物依附在其他建筑物如住宅楼里。箱式配电所是整个配电所所有设备由一个或几个可吊装运输的金属箱体组合而成，如箱式变电站。

配电所按其管理方式不同，分为有人值班和无人值班配电所。一般采用无人值班方式，由配电网调度所或中心变电所通过自动装置采集运行信息和数据，实施运行监控。

发展趋势 随着城市建设的不断发展，环境要求不断提高，配电负荷密度不断增大，配电所将有以下发展趋势：①小型化、免维护以及与环境协调，主设备多采用真空、SF_6气体绝缘和干式绝缘的小型电气设备及其组合装置，建筑色彩和场地绿化力求与环境协调。②中压进出线采用环网供电，主接线采用环网＋线路变压器组等简洁、灵活的接线方式，满足 $N-1$ 供电方式。③配电自动化实现对配电所设备的远程操控，设备工况、能耗、电能质量及用户端用电量等数据的远程监控及抄录，提高配电网运行效率及经济效益。

peidianwang

配电网 （power distribution network） 从输电网或地区发电厂接受电能，通过配电设施就地或逐级分配给各类用户的电力网。配电网及其二次保护、监视、测量与控制设备组成的整体称为配电系统。

分类 根据供电地域特点或服务对象的不同，可分为城市配电网和农村配电网；根据配电线路的不同，可分为架空配电网、电缆配电网及架空电缆混合配电网；根据电压等级的不同，可分高压配电网、中压配电网和低压配电网。在中国，高压配电网的电压一般有 35kV 与 110kV，东北地区使用 66kV，在一些负荷密度大的城市使用 220kV；中压配电网的电压一般为 10kV，个别地区使用 20kV 或 6kV；低压配电网的电压一般为三相四线制的 380/220V。有些国家将电网电压等级划分为输电电压、次输电电压与配电电压三类，110、66、35kV 等在电网发展历史中曾经起过输电作用的电压等级，称为次输电电压。

构成 配电网由各配电电压等级的配电设备或设施构

成，按功能可分为一次配电设备和二次配电设备。一次配电设备用于直接配送电能，配电线路、配电变压器、开闭所、环网单元、开关设备和避雷器等都属一次设备。二次配电设备用于实现对配电网运行变量的测量、保护与控制等，主要有控制开关、继电器、控制电缆、测量仪表、信号设备、自动装置，以及配电自动化的监控终端，如馈线终端单元（FTU）、变压器终端单元（TTU）、故障指示器等。

基本要求　包括：①供电安全可靠。要求停电的次数少，而且每次停电所影响的用户数和持续时间尽可能减少至最小限度。配电网的规划建设应充分考虑满足供电相关安全准则和用户供电可靠率等要求。②电能质量合格。衡量电能质量的主要指标为电网频率和供电电压质量，具体的考核指标包括供电频率允许偏差、电压允许偏差、三相电压不平衡、电网谐波、电压波动和闪变值等，这些指标均有国家标准。随着现代社会数字经济的发展，电压暂降越来越成为影响用户的主要供电质量问题。③环保安全经济。要求网络结构合理，配电设施与周围环境、与社会发展和环境保护协调一致，电网安全运行的技术水平先进且运行维护成本低、电能损耗小，实现多供少损。

特点　配电网直接面向用户，是确保供电质量最直接最关键的环节，其特点包括：①配电设备遍布城市和农村，是城乡公共基础设施的组成部分。②受市政建设和用户负荷发展的影响，网络结构与设备变动相对频繁。③中压配电网一般采用辐射形或环网开环运行的供电方式，分支线路大都采用T接；低压配电网则一般采用辐射形的供电方式。④配电网保护、控制装置的配置相对要简单一些，技术要求也相对低一些。如允许继电保护装置延时动作切除配电线路末端的故障，而在输电线路上任何一点发生故障时，都要求继电保护装置快速动作。⑤用户遭受的停电绝大部分是由于配电系统环节造成的。供电可靠性统计表明，扣除系统容量不足限电因素，因配电系统环节造成的停电，占总停电事件的96%左右，而高电压输变电环节造成的停电仅占4%左右。⑥电网一半及以上的传输电能损耗发生在中、低压配电网。

展望　配电网的发展趋势是向智能化方向发展，即从传统的供方主导、潮流单向流动、基本依赖人工管理的运营模式向用户参与、潮流双向流动、高度自动化的智能配电网发展。主要体现在自愈功能不断提升，支持分布式电源的大量接入，支持与用户互动等方面。

（1）自愈功能。能够及时检测出已发生或正在发生的故障并进行相应的纠正性操作，使其不影响用户的正常供电或将其影响降至最小，有效地缓解电压暂降和短时停电对敏感用户的影响，提供更高的供电质量。

（2）支持分布式电源的大量接入。通过保护控制的自适应以及系统接口的标准化，支持分布式电源的即插即用，通过分布式电源的优化调度，实现对各种能源的优化利用。

（3）支持与用户互动。①信息互动，应用智能电能表，实行动态实时电价，让用户自行选择用电时段，在节省电费的同时，为降低电网高峰负荷做贡献；②能源互动，创造条件让拥有分布式电源（包括蓄电池、电动汽车等）的用户在用电高峰时向电网送电。

同时，未来配电网将具有更高的资产利用率，通过实时监测电网设备温度、绝缘水平、安全裕度等，增加传输功率，提高系统容量利用率；通过对潮流分布的优化，减少线损，进一步提高运行效率；在线监测并诊断设备运行状态，延长设备使用寿命。

参考书目

李天友，金文龙，徐丙垠．配电技术［M］．北京：中国电力出版社，2008.

Short T A. Electric Power Distribution Handbook. CRC Press LLC，2004.

peidianwang butingdian zuoye

配电网不停电作业　(live working of distribution networks)　在对用户不停电的情况下进行配电线路或设备的测试、维修和施工的作业方式。主要包括：①直接在带电的配电线路或设备上作业，即带电作业；②采用旁路或移动电源等方法对用户连续供电，再将配电线路或设备停电进行作业。配电网不停电作业是配电网设备检修的作业方式之一，也是提高供电可靠性的重要手段，对增加供电企业售电量、提高作业效率、提高用户服务质量具有明显的效果。

作业条件　包括气象因素、安全距离、绝缘工具有效长度及其他防护措施。

气象因素　包括：①应在良好的天气下进行。如遇雷、雨、雪、雾天气，不得进行作业，风力大于10m/s（5级）以上时，不宜进行作业。②相对湿度大于80%的天气，若需作业，应采用具有防潮性能的绝缘工具。③在特殊或紧急条件下，必须在恶劣气候作业时，应针对现场气候和工作条件，制定可靠的安全措施后方可进行。夜间抢修作业应有足够的照明设施。④作业过程中若遇天气突然变化，有可能危及人身或设备安全时，应立即停止工作；在保证人身安全的情况下，尽快恢复设备正常状况，或采取其他措施。

安全距离　为保证作业人员的人身安全，作业人员与不同电位的物体之间所应保持各种最小空气间隙，包括最小安全距离、最小对地安全距离、最小相间安全距离和最小安全作业距离。

（1）最小安全距离。采用绝缘杆作业法时，人身与带电体之间应保持的最小距离。规定10kV及以下电压等级为0.4m（此距离不包括人体活动范围），20kV电压等级为0.6m。

（2）最小对地安全距离。带电体上作业人员与周围接地体之间保持的最小距离。规定10kV及以下电压等级为0.4m，20kV电压等级为0.6m。

（3）最小相间安全距离。带电体作业人员与邻近带电体之间应保持的最小距离。规定10kV及以下电压等级为0.6m，20kV电压等级为0.8m。

（4）最小安全作业距离。考虑到工作中必要的活动，采用绝缘杆作业法时，作业人员在作业过程中与带电体之间应保持的最小距离。规定10kV及以下电压等级为0.9m（此距离是指在最小安全距离的基础上增加一个合理的人体活动范围的数值增量，一般取0.5m），20kV电压等级为1.1m。

绝缘有效长度　绝缘工具在使用中遇到过电压不发生表面放电并有足够安全裕度的最小绝缘长度。10kV电压等级

的绝缘操作杆的有效长度为0.7m，支、拉（吊）杆及绝缘绳索的有效长度为0.4m；20kV电压等级的绝缘操作杆的有效长度为0.9m，支、拉（吊）杆及绝缘绳索的有效长度为0.6m。

其他防护措施　包括：①严禁作业人员穿、戴导电服和导电手套。②作业时必须采用主、辅绝缘的双重保护。③绝缘斗臂车的金属臂在仰起、回转运动中，与带电体的最小作业距离不得小于1m。④对于比较复杂、难度较大的项目应制定操作工艺方案和安全措施。⑤新作业项目和新工具，应进行试验论证，确认安全可靠，制定作业操作工艺方案和现场安全措施。

作业工器具　包括绝缘工具、金属工具和旁路工器具三大类。

绝缘工具　分为主绝缘工器具、辅助绝缘工器具和个人绝缘防护用具。①主绝缘工器具指隔离电位起主要作用的电介质，耐压水平不小于45kV（1min）的绝缘工器具，包括绝缘载人工具（绝缘斗臂车、绝缘硬梯、绝缘工作平台）、绝缘承力工具（绝缘横担）、绝缘（操作、支、拉、吊）杆、绝缘绳索等，见图1。②辅助绝缘工器具指除主绝缘外，为了安全另外增加的独立绝缘的工具，能限制人员作业范围，以防止作业人员接触带电体，包括绝缘罩、绝缘隔（挡）板、绝缘毯（布）、硬质绝缘管、软质绝缘管以及绝缘套筒等绝缘遮蔽工具。③个人绝缘防护用具指工作人员在作业时穿戴的起辅助绝缘保护作用的用具，包括绝缘帽、绝缘手套、绝缘鞋（靴）、绝缘袖（护）套、绝缘披肩、绝缘服。



图1　抱杆式绝缘工作平台

金属工具　包括拔锁钳、扶正器、取绝缘子钳、卡具、取销钳、紧线器、收紧器、机械/液压钳、剪线钳、飞车、起重滑车、清扫刷等。通常与绝缘工具配合使用。

旁路工器具　包括中间接头、三通接头、旁路开关及柔性旁路电缆、电缆支架和附件。

作业方法　主要有配电带电作业法、旁路作业法和移动电源法。配电带电作业法又分为绝缘杆作业法和绝缘手套作业法。

绝缘杆作业法　作业人员与带电部位保持相应电压等级的安全距离，通过绝缘工具进行的作业，又称间接作业法。作业人员远离带电体，依靠绝缘工具作为主绝缘，避免电流通过人体对地发生短路放电。当配电线路作业空间狭小，安全距离不能要求满足时，作业人员必须穿戴个人绝缘防护用具，采用安全防护用具，相对地和相与相之间的导体必须进行绝缘遮蔽，才能保证作业人员的安全。绝缘杆作业法既可在登杆作业中采用，也可在绝缘斗臂车的工作斗或其他绝缘平台上采用。图2所示为利用绝缘操作杆搭接引流线。

绝缘手套作业法　作业人员通过绝缘手套与周围不同电位适当隔离或遮蔽，直接对带电体进行的作业，又称直接作业法。在绝缘手套作业法中，作业人员必须借助绝缘斗臂车或其他绝缘设施，如人字梯、靠梯和操作平台等作为主绝缘，作业人员穿戴的绝缘手套、绝缘服、绝缘袖套、绝缘披肩和绝缘鞋等只能作为辅助绝缘。因为作业人员穿戴着绝缘手套直接接触带电体进行操作，它比绝缘杆作业法来得便捷和高效。同样由于配电线路的作业空间狭小，作业人员还必须穿戴全套绝缘防护用具，相与地和相与相之间的导体和邻近的接地体也必须进行绝缘遮蔽，这样才能保证作业人员的安全。绝缘手套作业法既可在绝缘斗臂车的工作斗采用，也可在其他绝缘平台上采用。



图2　不停电作业——利用绝缘操作杆搭接引流线

旁路作业法　应用旁路电缆（线路）、旁路开关等临时载流的旁路线路和设备，将需要停电的配电线路或设备转由旁路线路或设备替代运行，然后对原来的配电线路或设备进行停电作业，作业完成后再恢复正常供电方式，最后拆除旁路线路或设备。整个过程对用户不停电。

移动电源法　把需要进行作业的配电线路或设备从配电网中隔离出来，利用移动电源对用户连续供电，作业完成后再恢复正常供电方式，最后拆除移动电源。整个过程对用户少停电（停电时间为倒闸操作时间）或不停电。移动电源可以是移动发电车、应急电源车或者移动箱式变压器等。

移动发电车是装有发电机组的专用车，由汽车底盘、发电机组、配电控制柜和随车电缆等组成。发电机组一般由柴油机、发电机、控制箱、燃油箱、起动和控制用蓄电池、保护装置、配电柜等组成。整体可以固定在基础上定位使用，亦可安装在拖车上移动使用。

应急电源车（见图3）是装有应急电源（emergency power supply，EPS）的专用车。由汽车底盘、EPS和随车电缆等组成。应急电源是一种允许瞬间（电源自动切换时



图3　应急电源车

间）电源中断的应急电源装置，在供电网络正常供电时，处于"睡眠"的浮充电状态，逆变器不工作，供电网络供电中断时投入蓄电池经逆变器输出供电。主要包括整流充电器、蓄电池组、逆变器、互投装置、电池监测装置、控制系统、操作面板以及输入输出部件。

移动箱式变压器是可以移动使用的箱式变压器，又称负荷转移车或车载移动箱式变压器。由箱式变压器、底盘车、随车电缆等组成。箱式变压器由高压室（10kV 或 20kV）、低压室（400/230V）和变压器室组成。（见箱式变电站）

典型带电作业项目 分为中压带电作业项目和低压带电作业项目。

中压带电作业项目 包括：①简单常规带电作业项目有修补导线、搭接（拆除）空载引流线、更换绝缘子（耐张杆或直线杆）、更换横担、更换（加装）避雷器等。②复杂综合带电作业项目主要有带电立（撤）杆、更换直线杆、直线杆改耐张杆、带负荷更换（安装）柱上断路器等。

低压带电作业项目 主要有带电搭接低压接户线、低压配电箱搭接电源、带电处理断落接户线、带电更换电能表、带电隔离故障的电能表等。

参考书目

李天友，等．配电不停电作业技术．北京：中国电力出版社，2013.

peidianwang dianliu baohu

配电网电流保护

(overcurrent protection for distribution networks) 在配电网中以通过保护安装处的电流为作用量，且当通过的电流大于某一预定值（整定值）时动作的继电保护方式。保护装置通常由电流、时间、中间、信号等继电器按一定的逻辑综合组成，或以微机型继电保护装置来实现，用以保护配电线路、配电变压器、电容器、电抗器等电力设备。它可以依据相电流、相间电流或零序电流工作。除直接作用的电流保护外，还有经故障方向判别元件控制的电流保护。根据其动作时间和电流之间的关系，配电网电流保护具有两种特性：自定时限特性和他定时限特性。自定时限特性电流保护的动作时限与通过的电流（大于电流元件的起动值）无关，包括无时限（瞬时）和定时限；他定时限特性电流保护的动作时限与通过的电流（大于电流元件的起动值）有关，通常选择反时限特性，即通过的电流愈大，其动作时间愈短。

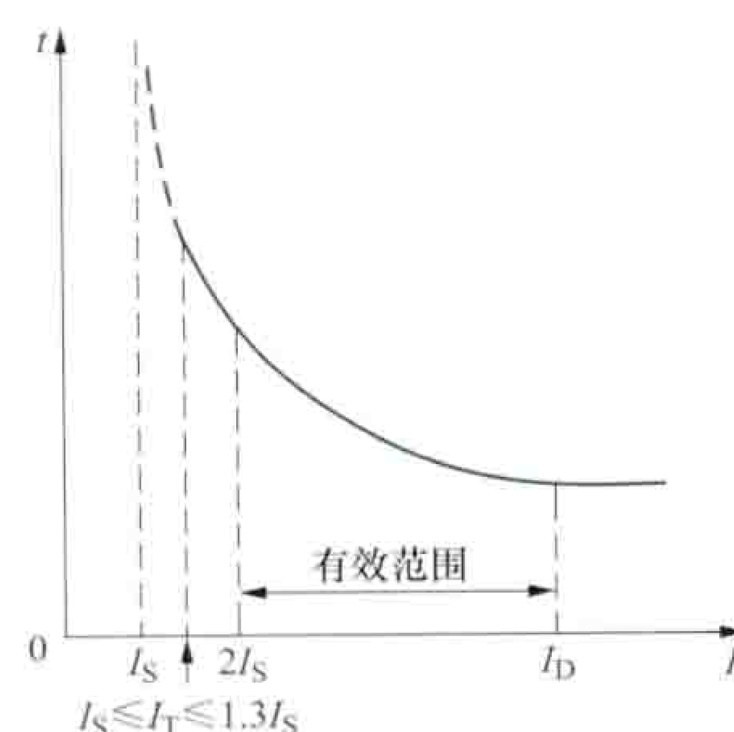
配电线路相间短路电流保护 用于配电网线路相间故障的电流保护。保护所接电流互感器采用两相不完全星形接线（仅适用于中性点不接地系统或经消弧线圈接地系统）或者三相星形接线。对于常见的单侧电源配电线路，其电源侧可装设阶段式电流保护，第一段为瞬时电流速断保护，没有时限，电流定值一般按躲开本线路末端最大短路电流整定；第二段为限时电流速断保护，电流定值按躲开下级各相邻元件电流速断保护的最大动作范围整定，可以作为第一段的后备保护；第三段为定时限电流保护，按照躲开本元件最大负荷电流来整定，具有比第二段更长的时限，作为过负荷保护，也可以作为第一段、第二段和下级各相邻元件的后备保护，保护范围最大，时限最长。单侧电源配电线路电源侧也可装设反时限电流保护，恰当地选择所需要的动作反时限特性，可以同时保证本线路短路故障时有较短的动作时间，而当相邻电力设备故障时又可以与后者的保护选择配合。对于双侧电源配电线路，可装设经故障方向判别元件控制的电流保护，未经方向元件控制时应考虑与背侧保护的配合问题。

瞬时电流速断保护 零延时（瞬时）动作的电流保护，即无时限电流速断保护，简称电流速断保护。该保护仅以电流继电器本身固有时间（或者再加上出口中间继电器本身固有时间）动作，通常为 10～40ms。如果配电线路短路会使重要用户母线电压低于额定电压的 60%或者线路导线截面积过小不允许带时限切除短路故障，且延时动作的电流保护的时限大于 0.5s，应装设瞬时动作的电流保护。一般情况下，电流速断保护电流定值应按躲过本线路末端最大三相短路电流整定。电流速断保护应校核被保护线路出口短路的灵敏系数，在常见运行方式下，三相短路的灵敏系数应不小于 1。

限时电流速断保护 动作时限很短（一般不大于 0.5s）的固定延时电流保护，也称为延时电流速断保护。其电流定值应与下一级瞬时电流速断保护配合，在本线路末端三相短路故障时灵敏系数应不小于 1.5。该保护既能以较短的时限保护线路全长，又不会在相邻电力设备故障时失去选择性。

定时限电流保护 动作时限较长（一般不小于 0.7s）的固定延时电流保护。电流定值原则上是按躲过线路最大负荷电流整定，在本线路末端三相短路故障时灵敏系数不小于 1.5，在相邻线路末端故障时力争灵敏系数不小于 1.2。时间定值的整定应比下一级定时限电流保护的动作时限多一个 0.3～0.5s 的时间级差。该保护作为过负荷保护，也可以作为下一级保护的远后备。

反时限电流保护 利用反时限电流继电器构成的配电线路延时电流保护，包括反时限部分和限时速断部分，IEC 60255-151（电流保护功能标准）给出的反时限特性见图。当通过的电流大于 I_D 时，为限时速断部分，继电器动作时限固定且很短（一般不大于 0.5s）；当电流介于 I_T 和 I_D 之间时，为反时限部分，通过的电流愈大，继电器动作时间愈短；当电流介于 I_S 和 I_T 之间时不能保证继电器动作；当电流小于 $2I_S$ 时不能保证继电器的动作时间精度。



反时限特性曲线

配电线路零序电流保护 用于经低电阻接地的配电网线路单相接地故障的电流保护。接地电阻一般为 6～30Ω，单相接地故障时零序电流（$3I_0$）不大于 1000A。保护所用的零序电流可由三相电流互感器组成零序电流过滤器来提供，也可由独立的专用零序电流互感器提供，视接地电阻阻值、接地电流和零序电流保护整定值大小而定。发生单相接地故障时，非故障线路中流过本线路产生的电容电流，而故障线路流过的故障电流为接地电流与系统电容电流的相量和，其值比非故障线路流过的电流大得多，所以采用零序电流保护就可以实现线路单相故障的保护功能。根据

系统的运行要求，可配置一段式零序电流保护或两段式零序电流保护，或者反时限零序电流保护。电流定值应躲过正常运行时该条线路的最大三相不平衡电流和外部发生接地故障时该条线路的最大电容电流，并保证本线路发生单相接地故障时的灵敏系数。由于发生单相接地故障时故障电流的大小受故障点位置的影响不大，所以在零序电流保护整定时，在保证选择性的前提下应尽量使灵敏度大一些，以减少因接地电阻的影响而使零序电流保护拒动的情况发生。动作时间可根据系统设备情况及运行要求来选择，一般可选 0.3～2s。

参考书目

贺家李，宋从矩．电力系统继电保护原理（修订版）．北京：中国电力出版社，2004.

peidianwang dianneng sunhao guanli

配电网电能损耗管理 (energy loss management of distribution networks)

为降低配电网产生的电能损失而开展的管理活动。在电力系统整体电能损耗中，大部分产生在配电网。配电网（包括高压配电网）的电能损耗约占系统总损耗的 70%，中低压配电网的损耗约占系统总损耗的 50%。电力系统产生的电能损耗称为线损。

线损分类 包括统计线损、理论线损、管理线损。

统计线损 根据电能表指示数计算的供电量与售电量的差值，又称实际线损。供电量指配电网向用户供出的电量，包括线损电量。售电量指供电企业卖给用户的电量，等于全部用户电能表计量的总和。

理论线损 根据配电设备的参数和配电网当时的运行方式及潮流分布以及负荷情况，由理论计算得出的线损。理论线损是确定线损计划指标和降低线损措施的理论依据。理论线损可以评估配电网结构及其运行方式的经济性，查明配电网损耗过大的元件及原因，考核统计线损是否真实、准确、合理以及统计线损率与理论线损率的差值，确定不明损失的程度，明确配电网运行管理的现状。通过分析线损的构成，即线路损耗和变压器损耗所占的比例、可变损耗和固定损耗所占的比例，可发现配电网的薄弱环节，制定降低线损的措施。

可变损耗指变压器绕组和配电线路导线中的损耗，也称负载损耗。可变损耗与通过的负荷功率或电流的二次方成正比。

固定损耗指变压器铁芯、电容器和电缆绝缘介质损耗以及电晕损耗等，也称空载损耗。固定损耗与元件所承受的电压有关，与通过的电流无关。

管理线损 由管理方面的因素而产生的损耗。包括电能表的综合误差，抄表不同时，漏抄及错抄，计算不准确，带电设备绝缘不良或污秽引起的漏电，配电网短路事故，无表用电和窃电等造成的损耗。管理线损并不是配电网的真实损耗情况，应采取必要的组织和管理措施予以避免和减少。

线损率指标管理 一定时期内线损管理活动与其达到的成果或效果，也称为线损率目标管理。目标有远期（≥10年）、中期（3～5年）、短期（1年）、执行（季度或月）之分，有总目标与分目标之分。线损率指标通常进行分级管理、按期考核，通常按电压等级、营业范围、馈线、台区线损率指标以及线损率管理小指标进行统计与考核。

线损率管理小指标是与线损率指标完成好坏密切相关的指标，如抄表正确率、实抄率、电能表校前合格率/校验率/轮换率/故障率、月末及月末日 24 点抄见电量（抄表时电表上的读数）比重、电费差错、降损电量完成率、母线电压不平衡率、电容器投入率、电压合格率、线路停电小时数、负荷率等。

降低线损的措施 包括技术措施和管理措施。

技术措施 包括配电网技术改造和加强配电网运行管理两方面。

（1）配电网技术改造。安装无功补偿装置、更换高耗能配电变压器等。技术改造需要一定的投资，应根据技术经济比较论证其合理性。

（2）加强配电网运行管理。①均衡配电网负荷分布，调整运行方式，避免馈线重载发热增加线路损耗。②改造不合理的网络结构，减少迂回供电，缩短供电半径，使配电所、变压器更接近负荷中心，可有效降低线路损耗。③在负荷不变的情况下，增大导线截面，减小线路电阻，可明显达到降低线损的效果。④淘汰高耗能变压器，停运空载变压器，合理配置变压器容量，平衡变压器三相负荷，可有效降低变压器损耗。⑤合理补偿无功功率，提高功率因数，从而降低无功电流引起的损耗。⑥利用配电自动化等管理手段，做好负荷预测和监控，降低电能损耗。

管理措施 在中国，管理措施主要有：①加强职业道德教育和岗位培训，提高营业人员的思想和业务素质。②加强防范措施，如采用防窃电技术、定期或突击组织检查、轮换抄表人员等。③严格抄表审查制度，采用自动抄表管理系统。④加强电能计量管理，加强计量关口管理。⑤依法管电，严肃处理窃电行为。⑥定期进行线损分析，及时制订降低线损措施实施计划。⑦做好线损理论计算工作，推广理论线损的在线测量，及时掌握线损分布与薄弱环节。⑧制定切实可行的线损率指标和奖罚措施，实行逐级承包考核。⑨做好配电网规划设计与配电网改造工作，使网络结构趋于合理，处于经济运行状态。⑩学习计量法律、法规、技术规范，提高电能计量管理水平，保证电能计量装置有效、受控。

见降低线损技术。

peidianwang dianya dengji

配电网电压等级 (voltage grades of distribution systems)

在配电网中使用的标称电压值系列。根据电力系统的输电电压以及所在供电地区的负荷分布、负荷密度、地区生产和建设的发展条件确定。中国配电网的电压等级：高压配电电压为 110（66）、35kV；中压配电电压为 10（20）kV；低压配电电压为 380/220V。在负荷密度大的一些城市电网中，220kV 电压兼有高压配电功能。各个地区根据各自特点采用 110（66）kV 或 35、10（20）kV，380/220V 三级配电电压。对于一些特殊的城市，如中国苏州工业园区根据规划的高负荷密度，采用 220、20kV，380/220V 配电电压。法国巴黎采用 225、20kV，380/220V 配电电压。

电压等级选择原则 配电网电压等级的选择，关系到电网在安全经济运行的条件下向各级用户提供充足、合格、不间断的电能，还决定了配电设备的绝缘水平，以及配电网的

建设投资、运行费用和经济效益等。要根据技术经济和建设发展综合论证选择确定，以达到满足供电需要，技术先进可行，运行灵活可靠，投资经济合理。具体考虑以下几个方面：①满足供电区域内对电力供应的需求，并能适应一定时期内负荷密度的增长；②与配电网的改造工作相结合，便于整个配电网的发展，保证运行灵活、安全可靠、质量合格、经济合理；③设备供应与制造技术上的可能性、可靠性和经济性；④尽量简化同一区域内配电网的电压等级，减少变压层次；⑤建设与改造的投资最为经济合理。

电压等级标准化　在正确选择供电电压等级的基础上，世界上大多数国家都已制定了适合本国国情的国家配电电压标准，作为逐步统一本国供电电压的依据。对于历史上已经存在的与标称电压等级不符的电压等级，作为需要过渡的电压等级，最终实现电压等级的标准化，如法国巴黎的中压配电网经过近 30 年的改造统一为 20kV。

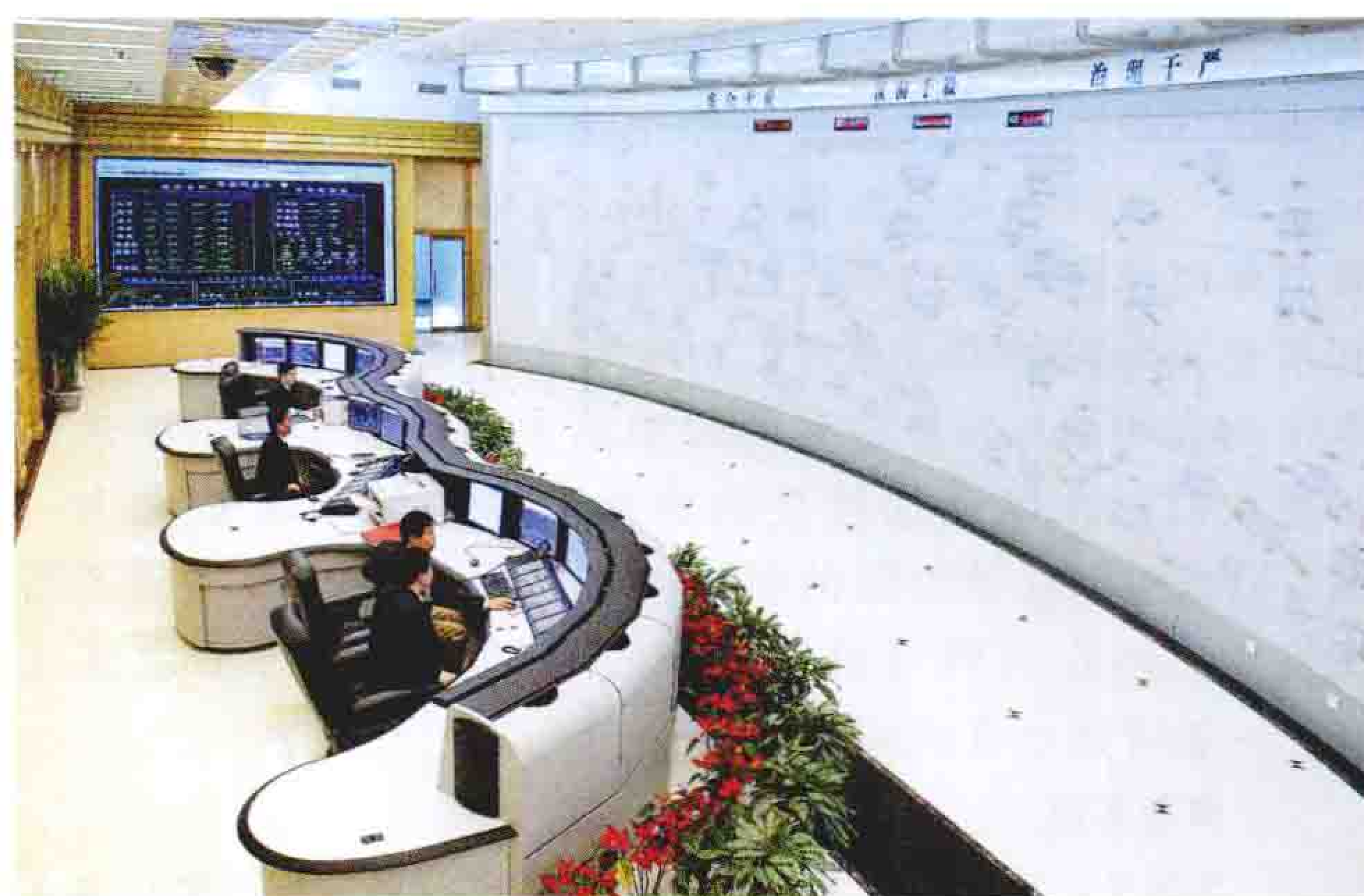
历史与发展　配电网中压电压等级在全世界的运行历史上不下 20 种，随着经济社会的不断发展，城市供电负荷密度的不断增大，土地及线路走廊资源日益稀缺，各国都通过技术经济比较并制定发展规划，逐步形成适合本国（或本地区）经济发展的相对统一的中压配电电压等级。韩国中压配电网原多为 6.6kV，从 20 世纪 70 年代开始进行升压为 22.9kV 的改造，经过近 30 年直至 20 世纪末才完成。法国中压配电网原有 5.5，10，15，20，30kV 5 种，20 世纪 60 年代初，通过标准化研讨和技术经济论证，选定 20kV 电压等级，也经过 30 多年的改造，已基本完成。俄罗斯、新加坡、意大利的罗马、美国的纽约等国家或城市的中压配电网均采用 20kV 左右的电压等级。

在实施配电电压标准化过程中，一个地区或一个城市的配电电压一般只选三级，如直接采用 220kV/20kV/380V 三级配电网，简化电压等级、减少变压层次，这对于远景较高负荷密度的城市新区具有较大优势。

peidianwang diaodusuo

配电网调度所　(dispatch center of distribution networks)

对配电网运行、操作和事故处理进行组织、指挥、指导和协调的机构。配电网调度所既是生产运行单位，又是职能管理机构，在业务上接受地区调度机构的领导，接受其调度指令。负责调度运行管理、运行方式制定、设备倒闸操作、事故处理以及继电保护、安全自动装置（见配电网继电保护、配电网继电保护配置）定值整定等日常工作。实行全天 24h 有调度人员值班制度，按照规定的标准和程序执行各种调度任务，在其管辖范围内行使指挥权力。图示为中国华北电网调度控制大厅。



中国华北电网调度控制大厅

（国家电网公司华北分部　提供）

调度运行管理　对配电网运行、操作和事故处理进行组织、指挥、指导和协调的管理活动。（见配电网调度运行管理）

调度指令　调度机构值班调度员发布的有关运行和操作的指令。可分为口头令和操作令。

口头令　由值班调度员口头下达（无须填写操作票）的调度指令。为加快事故处理速度，一般多采用口头令。

操作令　值班调度员对所管辖设备进行操作，发布的有关操作的指令。分为单项操作令、逐项操作令和综合操作令。①单项操作令。值班调度员发布的单项操作的调度指令。②逐项操作令。值班调度员根据一定的逻辑关系，按顺序下达的综合操作令或单项操作令。③综合操作令。值班调度员说明操作任务、要求、操作对象的起始和终结状态，具体操作步骤和操作顺序项目由受令人按规定拟定的调度指令。

运行方式制定　根据配电网接线方式、负荷分布及其正常变化规律制定配电网运行方式。配电网运行方式的制定通常考虑一般负荷水平和迎峰度夏负荷水平两种。一般情况下，配电网运行方式固定，不做调整。在迎峰度夏前，首先对上一年度的运行情况进行分析，重点考察负荷重、难转移的线路，在均衡负荷、保证多电源用户供电的基础上，制定运行方式调整方案和线路改造方案。对于重要的多路电源用户，要求从两个不同的电源点引线，且上级变电站来自不同的电源，对特别重要的用户要求 10kV 进线电缆不同沟、架空线路不同杆。包括配电网年、月、日运行方式以及特殊时期保供电措施。

年度运行方式　主要内容包括：①上年度配电网运行情况总结；②本年度新建及扩建设备投产计划；③按照配电网稳定、潮流、短路计算、经济运行等方面，确定正常运行方式及主要事故方式；④继电保护及自动装置运行方案；⑤配电网可能的接线方式；⑥典型日有功负荷曲线；⑦典型日 10kV 各出线正常方式的最大负荷表；⑧系统安全运行存在的问题及采取的措施。

月度运行方式　主要内容包括检修计划安排、运行方式安排及其他注意事项。

日运行方式　主要内容包括：①审批设备检修申请；②线路负荷预测；③运行方式的调整；④主要电气接线方式变化时的潮流分布和反事故措施；⑤新建、扩建及改建设备投运措施及方案；⑥有关配电网运行注意事项。

特殊时期保供电措施　特殊时期（节假日、重大活动等）的保供电预案，在保供电日前一周报地区调度机构备案。

设备倒闸操作　变更设备运行状态的行为。配电网的设备状态包括运行、热备用、冷备用和检修四种状态。配电网倒闸操作包括高压开关分/合闸操作、线路停/送电操作、倒换母线操作、变压器停/送电操作、环网解并列操作等。倒

闸操作必须根据值班调度员的指令，受令人接令并复诵无误后执行。调度指令应准确、清晰，使用规范操作术语。倒闸操作须由两人执行，特别重要和复杂的操作，由熟练的值班员操作，值班负责人或值班长监护。

事故处理 配电网发生事故时的处理过程。值班调度员为事故处理的指挥者，对事故处理的正确性和及时性负责。故障处理期间，值班调度员有权拒绝回答任何与故障处理无关的询问；为迅速消除故障，非故障单位不得在故障处理期间占用调度电话询问故障情况。主要任务：①迅速限制故障的发展，消除或隔离故障的根源，及时解除对人身和设备安全的威胁；②在保证人身安全的前提下，尽快对停电用户恢复供电，特别是重要用户要优先恢复供电；③调整配电网运行方式，恢复正常供电。主要内容包括：频率异常处理、线路故障跳闸处理、变压器故障跳闸处理、母线电压消失故障处理、小电流接地（见中压配电网中性点接地方式）故障处理、设备过载处理、通信中断处理等。

定值整定 继电保护、安全自动装置动作设定值的计算。定值整定是保证配电网继电保护装置、安全自动装置正确动作的关键环节。调度机构根据计算资料进行定值计算，下发调试定值单，经现场调试无误后形成继电保护定值单。

计算资料 进行定值整定的基础资料。主要包括：①系统接线图和设备命名编号；②系统正常及可能出现的运行方式；③系统母线电压，电流互感器变比，线路长度及型号，线路最大负荷电流；④保护装置技术说明书和装置定值清单。

继电保护定值单 现场设置整定值的书面依据。必须有计算人、审核人、批准人三级审批签字，并加盖继电保护定值专用章。在运行方式变化后，应对继电保护定值进行校核，校核后需要临时改变继电保护装置整定值时，按临时定值单下发。继电保护装置定值的调整，应根据继电保护定值单的要求，按照调度指令在规定时间内完成，以保证各级继电保护装置、安全自动装置定值的互相配合。

peidianwang diaodu xieyi

配电网调度协议

(dispatch agreements of distribution networks) 供电企业与并网电厂和双电源以上用户签订的合同约定。包括并网电厂调度协议和用户调度协议。其目的是保障配电网安全、可靠、优质、经济运行，合理划分供电企业与并网电厂、用户的合法权益和相关责任。在中国，配电网调度协议应根据《中华人民共和国电力法》《中华人民共和国合同法》《电网调度管理条例》以及其他有关法律、法规，本着平等、自愿、诚实信用的原则制定。



并网电厂调度协议 基本内容包括并网条件、调度运行、发电计划、设备检修、继电保护、调度自动化、调度通信、事故处理与调查等。

并网条件 对电厂继电保护、调度自动化设施、计量设施、调度管理制度以及反事故措施提出的基本要求。

调度运行 对并网电厂调度运行的要求。①调度指令。由调度值班调度员下达的调节、操作指令。电厂运行值班人员在运行中必须严格服从并迅速、准确执行调度指令。②调度计划。调度机构依照有关要求安排的电厂日发电调度计划曲线。运行中，调度值班调度员可根据实际运行情况对日发电调度计划曲线做适当调整。③异常情况处理。电厂运行设备出现异常情况时，电厂按照电力系统调度规程的规定向调度机构提出检修申请，按照最终批复执行。④调峰、调频、调压、备用。调度机构按照同网同类型同等技术条件的机组调整幅度基本相同的原则，兼顾电网结构和电厂的电气技术条件，安全、优质、经济地安排电厂参与电力系统调峰、调频、调压、备用。

发电计划 对电厂发电机组有功出力做出的规定。电厂根据已签订的购售电合同及电厂运行实际情况，按要求向调度机构提交电厂的年度、月度、节日、特殊运行方式发电计划建议。调度机构编制电厂次日日发电调度计划曲线，并每日将次日计划曲线下达给电厂，电厂根据日发电调度计划曲线和调度指令，及时调节机组的有功出力，安排电厂生产运行。

设备检修 对电厂发电机组检修计划的要求。电厂在提交发电计划建议的同时，将年度、月度、节日、特殊运行方式的设备检修计划建议报电力调度机构，协商后，由调度机构将电厂设备检修计划纳入电力系统年度、月度、节日、特殊运行方式检修计划。

继电保护 对继电保护及安全自动装置的运行管理的要求。调度机构和电厂分别对所管辖的继电保护及安全自动装置进行整定计算、定期进行校验与维护，并严格执行国家及有关部门颁布的继电保护及安全自动装置反事故措施。

调度自动化 对调度自动化系统运行管理的要求。调度机构和电厂分别对所管辖的调度自动化系统进行运行维护，确保双方调度自动化系统的正常运行。

调度通信 对调度通信系统的运行管理的要求。调度机构和电厂分别对所管辖的调度通信系统进行运行维护，确保双方调度通信系统的正常运行。双方通信网互联的通信设备选型和配置应协调一致，均需有备用通信系统，确保电网或电厂出现紧急情况时的通信联络。

事故处理与调查 对运行事故处理与调查的规定。在威胁电网安全的任何紧急情况下，调度机构值班调度员可以采取必要手段确保和恢复电网安全运行，包括调整电厂发电机组出力、发布开停机指令、对电厂实施解列等。在事故发生后，调度机构和电厂均应按照相关规定进行事故调查。事故调查的结论应包括：事故原因、事故责任方及其承担的责任、防止类似事故发生的反事故措施。

用户调度协议 包括供电方式、用电方式、设备维护、用电管理等基本内容。

供电方式 供电企业向申请用电的用户提供的电源特性、类型及其管理方式的统称。包括供电频率、额定电压、电源相数、电源地址、电源数量、供电回路等。通常情况下，供电方式的确定以供电电压等级和电源数量最为

重要。

用电方式　包括用电容量、用电地址和用电性质。用电容量是用户申请用电的报装容量，包括受电变压器及直供高压电动机容量和台数总和。用电地址是用户用电场所的地理位置及用电地点。用电性质则包括电力用途、用电负荷重要程度、用电班次及时间、用电功率因数、保安用电设备及保安负荷等。

设备维护　明确供用电设施维护的主体、内容、界限和各自应当承担的责任。包括产权分界点、电气分界点、运行维护管理等。

用电管理　包括闭锁装置、自投装置、继电保护、容量限制、计划停电等方面。①闭锁装置。正常运行时，工作电源与备用电源必须加装可靠的闭锁装置，防止两电源并列。对闭锁装置应定期检查，保证操作安全可靠。②自投装置。对备用电源自投装置定期进行校验，保证其正常运行。两回路进线开关均需装设失压延时掉闸回路，必须保证工作电源断开后再进行自投，并有事故闭锁。③继电保护。继电保护与自动装置的定值由调度机构确定，用户不得擅自变更和改动。④容量限制。用户的工作电源和备用电源不准向其他用户转供电，也不得超过约定容量用电。⑤计划停电。当调度机构对其中一个电源回路计划停电时，调度机构应按有关规定提前通知用户，根据电网实际情况和用户需求，批复用户倒用其他电源回路。调度机构在线路检修、改造过程中，用户不能随意改变相位，否则应做定相试验，以确保相位正确。

peidianwang diaodu yunxing guanli

配电网调度运行管理

(dispatch management of distribution networks)　对配电网运行、操作和事故处理进行组织、指挥、指导和协调的管理活动。供电企业内有专门的调度机构（见配电网调度所）负责调度运行管理。调度机构既是生产运行单位，又是职能管理机构，在配电网运行中行使调度指挥权。

主要内容　包括：①服从所属调度机构的调度指挥和专业管理。②执行配电网调度管理的规程、制度、措施。③负责管辖范围内配电网的调度、运行方式、继电保护定值、自动化等专业管理。④组织调度管辖范围内具备条件的并网发电厂、用户签订调度协议（见配电网调度协议）。⑤组织编制和实施本地区管辖范围内的配电网运行方式，批准管辖范围内的设备检修。⑥指挥管辖范围内设备的运行、操作及事故处理，组织事故初步分析。⑦负责配合所属调度机构进行地区电网的调压（见配电网无功功率与电压控制）。⑧负责管辖范围内继电保护及安全自动装置（见配电网继电保护）定值计算。⑨负责管辖范围内新建、改建与扩建设备的命名编号，审批新设备投运申请，制定设备启动调度方案并进行调度指挥。⑩按要求配合完成事故和超计划用电拉闸限电序位表的编制工作，严格执行用电计划。⑪负责管辖范围内调度信息的发布。⑫负责管辖范围内调度系统人员从事调度相关业务工作的培训和考核。

管辖范围　通常为供电企业所辖的中低压配电网及其设备。一般也包括变电站的中压馈线断路器及其设备以及配电网调度协议规定的用户侧设备。

管理模式　包括调配一体化管理模式和专业管理模式。随着配电网规模日益扩大，用户对供电可靠性要求不断提高，并多趋向于采用专业管理模式，以进一步提高管理水平。

调配一体化管理模式　主网与配电网调度合一的电网调度运行管理模式。调度员业务同时涉及主网和配电网调度工作，有利于变电站出线断路器与馈线分段开关的协调控制，但在主网和配电网同时故障时，易顾此失彼，人为延迟恢复送电时间，影响供电可靠性，还会给安全生产埋下隐患。适合规模较小的配电网的调度运行管理。

专业管理模式　独立的配电网调度运行管理模式。在中国，按照“统一调度、分级管理”的原则，配电网调度与主网调度分离，实现配电网调度运行的专业化、精细化管理。在业务上，配电网调度作为地区调度的下级调度机构服从地区调度的统一调度，指挥所管辖范围内电网的运行、操作和事故处理。适合规模较大的配电网的调度运行管理。

peidianwang fuhe midu

配电网负荷密度

(load density)　一定供电地区内，最高负荷时，配电网线路的回路长度或供电区域内占地面积内的平均单位负荷值。它是表征负荷分布密集程度的量化参数，以 kW/km、kW/km^2 或 kV·A/km、$kV·A/km^2$ 计量。对中、低压配电网的负荷，一般都可以视作均匀分布负荷；对特别集中的高层建筑和某些工厂负荷，其占地面积小、建筑面积大、负荷高，则可以点负荷来处理，并不适合采用局部面积的负荷密度来表示。

随着经济的发展，城市负荷密度迅速上升。20 世纪 80 年代初期，英国伦敦市区的平均负荷密度为 $5.7MW/km^2$；日本东京市区的平均负荷密度为 $6.7MW/km^2$。上海市区的平均负荷密度为 $6.7MW/km^2$。到 90 年代中期，英国伦敦市区的平均负荷密度达到了 $21MW/km^2$，日本东京中心区的平均负荷密度达到了 $22MW/km^2$。2010 年上海中心城区平均负荷密度高达 $19.5MW/km^2$。

配电网负荷主要是分散负荷，均匀或不均匀地分布在电力网沿线或供电地区内，其余极少数为集中负荷。在计算配电网负荷密度时，实用上对配电网的负荷都可按均匀分布来处理，其中以配电网单位回路长度表示的负荷密度，可用于配电网线路的电压降级线损等计算。而以面积表示的配电网负荷密度则可用于配电网负荷预测、配电变电所位置和容量的规划、供电半径的确定和供电方式的选择。在一个供电地区内，若负荷均匀分布，且架空配电网的布置已知时，上述两种不同单位的负荷密度值可以相互变换。

peidianwang fuhe texing

配电网负荷特性

(load characteristics of distribution system)　配电网负荷的固有性质和变化规律。由于配电网负荷由众多不同类型的用电负荷综合组成，因此配电网负荷特性是各类用电负荷性质的总体反映，与各类用电负荷的性质及其在电网总负荷中占比重有关。研究和掌握配电网负荷特性，有利于掌握地区负荷的增长规律及其对供电质量和安全可靠性的要求，正确选择配电网络接线，合理配置配电设施的容量和型式，安排合适的供电方式，不断提高配电网经济效益和安全可靠性。

负荷特性分析 包括随机变化的特性和周期变化的特性。

随机变化的特性 配电网负荷的随机性可以分为内在随机性与外在随机性两种。内在随机性主要是由电力系统中非线性元件的特性决定的。因为，电力系统本身就是一个大型的非线性系统，而配电网负荷是该系统中重要的一部分。因此，配电网负荷也具有非线性特性，外在表现形式就是配电网负荷数据随机变化的特性。

周期变化的特性 配电网负荷具有随机性的同时，还有一个明显的特点就是配电网负荷变化的周期性，主要是由于温度、气候和工作规律等的影响而造成的。外在表现为负荷的季节性变化、周循环、工作日与节假日变化等特征。例如，每年配电网负荷的峰值往往出现在夏季和冬季，低谷出现在春季和秋季；每周的配电网负荷周一到周五的变化具有规律性，双休日负荷相对较低，在节假日期间，负荷值也会出现降低的情况。

负荷特性的主要指标 配电网的负荷特性实用上常以负荷电气量（如电流、视在功率、有功功率、无功功率、功率因数、谐波分量等）随时间变化的规律来反映，可用曲线表示，更常用的是用指标数据来表示。按照负荷特性统计时段，可将负荷特性指标体系分为日负荷特性指标、周负荷特性指标、月负荷特性指标和年负荷特性指标。

日负荷特性指标 反映24h内电力负荷的变化特性的指标。常用的日负荷特性指标有：①（典型）日最大（小）负荷。(典型日）每日24个整点负荷中的最大（小）值。典型日一般选用最大负荷日，也可选用最大峰谷差日，还可根据各地区情况选不同季节的某一代表日。②日平均负荷。日电量除以24或每日24个整点负荷的平均值。③日负荷率。日平均负荷与日最大负荷的百分比。④日最小负荷率。日最小负荷与日最大负荷比值。⑤典型日负荷曲线。典型日按时间顺序以小时整点负荷表示的负荷曲线，见图1。⑥日峰谷差。日最大负荷与日最小负荷之差。⑦日峰谷差率。日峰谷差与日最大负荷的百分比。

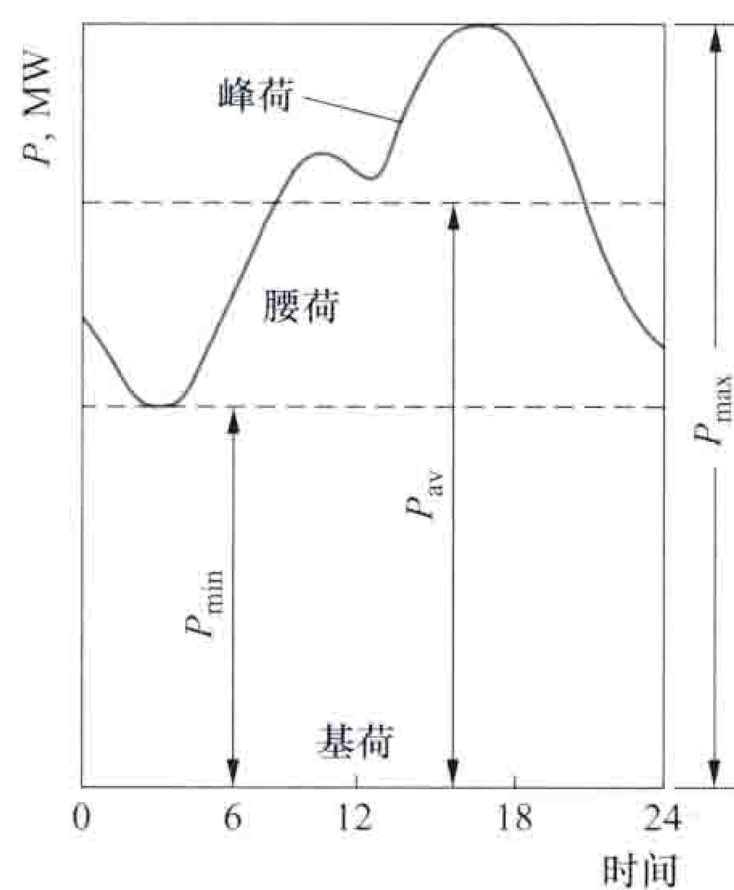


图1 日负荷曲线图

周负荷特性指标 反映一周内配电网负荷变化特性的指标。一般以周负荷曲线来表征周负荷特性，即每周按时间顺序逐日最大负荷曲线。

月负荷特性指标 反映一个月内配电网负荷变化特性的指标。月负荷特性指标主要有：①月最大（小）负荷。每月最大（小）负荷日的最大（小）负荷。②月平均日负荷。每月日平均负荷的平均值。③月平均日负荷率。每月日负荷率的平均值。④月负荷率。又称月不均衡率，每月平均日负荷与最大日负荷的比值。⑤月最小负荷率。每月日最小负荷率的最小值。⑥月最大峰谷差。每月日峰谷差的最大值。⑦月最大峰谷差率。每月日峰谷差率的最大值。⑧月平均日峰谷差。每月日峰谷差的平均值。⑨月平均日峰谷差率。每月日峰谷差率的平均值。

年（季）负荷特性指标 反映一年或一个季度内配电网负荷变化特性的指标。典型的年（季）负荷特性指标有：①年最大（小）负荷。全年各月最大（小）负荷的最大（小）值。②年平均日负荷。全年月平均日负荷的平均值。③年平均日负荷率。全年月平均日负荷率的平均值。④年平均月负荷率。全年各月平均负荷之和与各月最大负荷日平均负荷之和的比值。⑤季负荷率。又称季不均衡系数，全年各月最大日的最大负荷之和的平均值与年最大负荷的比值。⑥年负荷率。全年平均负荷与年最大负荷的比值。⑦年最小负荷率。全年日最小负荷率的最小值。⑧年最大峰谷差。全年日峰谷差的最大值。⑨年最大峰谷差率。全年日峰谷差率的最大值。⑩年平均日峰谷差。全年日峰谷差的平均值。⑪年平均日峰谷差率。全年日峰谷差率的平均值。⑫年最大负荷利用小时。年用电量与年最大负荷的比值。⑬年持续负荷曲线。按全年中系统负荷的数值大小及其持续小时数顺序绘制的曲线，见图2。⑭年负荷曲线。按全年中逐月最大负荷绘制的曲线。

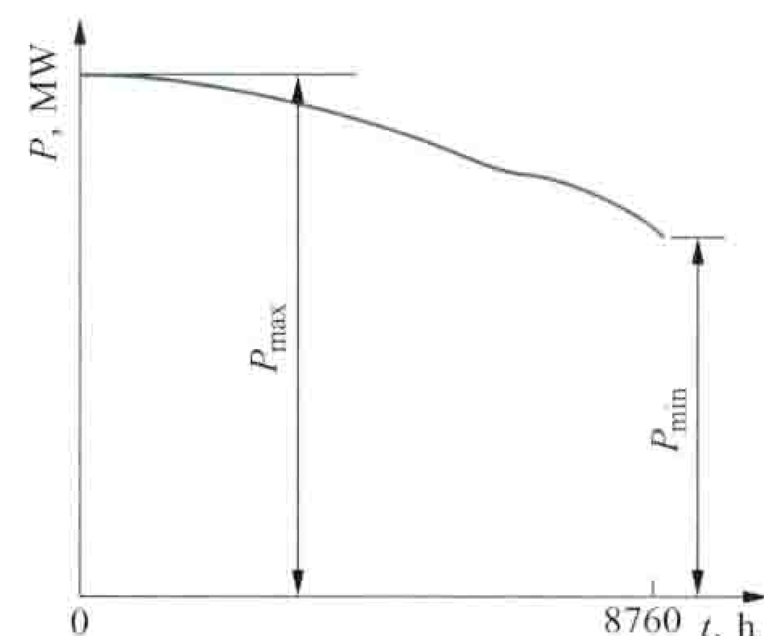


图2 年持续负荷曲线

负荷特性的应用 配电网负荷特性可作为合理规划配电网、配置供电设备容量、安排电网运行方式等工作的基本依据。例如：①负荷特性的数据可用于进行配电网规划所需的负荷需求预测；②有功和无功电流则可用于配电网供电设备、无功补偿设备的配置和电压降计算；③负荷曲线可用来估算配电网中设备承载负荷的能力，制定电网改造和发展规划。④负荷特性的一些数据可用于负荷管理，制订调度计划，安排运行方式等工作。

peidianwang fuhe yuce

配电网负荷预测 (load forecast of distribution network)

对配电网未来一定时期内负荷的功率和用电量的预测。其目的是为配电网规划设计部门和调度运行部门提供制定发展规划和工作计划所需的数据与资料。

分类 按负荷预测的应用部门不同，配电网负荷预测可分为用于供电网运行调度部门制定运行方式等的调度用负荷预测和为电网规划设计部门制定配电网规划设计方案提供依据的规划用负荷预测，两者在预测期限上的界定有所差异。

电网规划设计部门按预测期限的不同将负荷预测分为短期（如1～2年)、近期（如5年)、中期（如10年）和远期（如20年）的预测。

电网运行调度部门则将预测分为超短期、短期、中期和长期负荷预测。①超短期负荷预测。未来1h以内的负荷预测。②短期负荷预测。日负荷预测和周负荷预测。③中期负荷预测。月至年的负荷预测。④长期负荷预测。未来3～5年甚至更长时间段内的负荷预测。

实际应用中，不做特殊说明时短期负荷预测一般用于配电网调度运行的负荷预测，而将预测期限为5、10年或20年的负荷预测统称为规划设计负荷预测。

短期负荷预测 一般用于配电网调度运行，以预测负荷的功率为主的负荷预测工作。供电企业根据短期负荷预测的结果制订电力生产计划，决定配电网运行方式和安排设备检

修及更换程序。短期负荷预测的方法很多，其中基于时间序列和基于神经网络的预测方法较为成功，经常采用的数学模型有自回归模型（AR）、移动平均模型（MA）、自回归-移动平均模型（ARMA）和累积式移动平均-自回归模型（ARIMA）、基于人工神经网络（ANN）的模型等。

规划设计负荷预测　用于供电企业规划设计部门制定电网发展规划的负荷预测工作，是编制配电网规划设计的基础和依据，包括近期、中期和远期预测。预测的水平年应该与规划年限相配合，近期按年分列，中期、远期可只列规划期末的数字。该类负荷预测的结果包含最大有功功率预测、用电量预测和负荷特性的分析预测等。

负荷预测方法　配电网负荷预测采用的基本方法是电量预测法和负荷密度法。

电量预测法　先预测年用电量，再除以年最大负荷利用小时，从而得到最大负荷值。年最大负荷利用小时可用年平均日负荷曲线的负荷率乘以时间 8760h 求得，也可根据当地用电行业构成，根据类比法、统计分析方法确定。不同行业的用电特性存在差异，可以按标准的行业类别划分结果，对各典型行业用电负荷、负荷特性进行分别预测。电量预测法分宏观方法和按不同用途累计的微观方法两大类。

宏观方法可以考虑用电量与社会经济数据（例如 GDP，分产业或行业的产值等）的关系构造预测模型进行预测。过去，中国电力行业广泛采用单耗法进行电量预测，其基本思路为根据计划产品数量（或产值）和用电单耗来推算年用电量［见单位产品（产值）耗电］。其准确程度取决于产品数量及所掌握的单耗变化趋势和产品结构变化的正确性，市场经济的发展及产业结构的调整和技术的进步，使得单耗法在使用效果上受到了很大影响，一般只作为中长期预测结果的初步校核分析手段。弹性系数法在中国电力行业的电量预测工作中也曾经广泛应用，由于类似的原因，已不推荐为电量预测的主要方法，一般只适用于校核中、远期的预测。

常用的电量预测法有综合用电水平法、外推法、报装容量折算法。

综合用电水平法是根据地区人口和人均年用电量来推算年用电量。该方法适用于预测居民生活用电。其关键在于预测的基础数据信息充分、准确，预测的参数适当。

外推法是运用历史资料和数据进行建模、外推延伸，以预测未来各年的用电量。该方法适用于历史资料较为完整的现有配电网。常用的外推法有回归分析法、平均增长率法等。

报装容量折算法是通过探求本年度业扩报装容量与次年度售电增量的关系，进行次年度售电量的预测。电力企业的业扩报装容量是售电增量的直接来源，因此本期业扩报装容量（或装接容量）与今后一段时期的售电增量之间存在某种规律性的关系。报装容量折算法通过售电增量与上期大工业、非普工业和商业三大类合计业扩报装容量的比例关系，对后期售电量进行预测。该方法适用于中长期（年度、半年、季度）售电量预测。

负荷密度法　将配电网供电范围划分为若干供电区，由各分区现有负荷值计算现有负荷密度值，进而根据地区规划中有关的分区规划，参考国内外类似分区的用电水平，估计规划期内各分区可能达到的负荷密度预测值。选择类比的分区时，一般以地区的经济发展、产业结构、市政建设及人口和居民生活水平等为参考。负荷密度法适用于地区内大量分散的用电负荷，而少数集中用电的大负荷，可作为点负荷单独考虑。

负荷预测流程　供电企业进行负荷预测工作时一般工作流程为：①确定负荷预测目标，包括要预测的量（功率或电量）、预测量的时间间隔、预测结果的最终用途，拟定需要收集的历史记录资料，制订预测计划。②收集与分析负荷的历史资料，根据需要对数据资料进行必要的预处理。③建立负荷预测的基本模型，对历史资料进行分析，建立最适于描述该负荷变化过程的模型，并根据模型的特性及历史资料，对模型进行参数辨识与估计。④对参数估计结果及模型本身进行合理性检验。⑤确定预测模型和预测结果，根据预测时间跨度以及地区发展特点，对在线连续预测的模型参数进行更新，对离线预测模型进行不断校正，以得到尽量可信的预测结果。

见用电负荷预计。

peidianwang guzhang dianliu xianzhiqi

配电网故障电流限制器　（distribution fault current limiter，D-FCL）　一种串接在配电网并通过增大短路状态下回路的阻抗，将短路电流降低到合理水平的电气设备。可分为被动型与主动型两种。被动型 D-FCL 在正常运行与短路故障状态下，阻抗维持常值，串接后均增加系统阻抗，其特点是构成简单，但在正常运行状态下会产生电压降，增加系统损耗，限流电抗器就是被动型 D-FCL。主动型 D-FCL 正常运行阻抗很小，只是在短路故障状态下快速增加系统阻抗，既有限流作用，又不影响系统的正常运行，是理想的限流设备。主动型 D-FCL 有高压限流熔断器、热敏电阻（PTC）故障限流器和电力电子故障限流器。

限流电抗器　通常由干式绝缘、空心、自然冷却的线圈组成，其典型配置方式主要是母线联络方式、线路端接入方式、串接于变压器支路和加装在变压器中性点等方式。空心电抗器在故障状态时的电抗值维持常数，适合于限制故障电流，是最为成熟的配电网故障电流限制器。这种限流器在系统正常运行期间会造成电压损失并产生一定损耗和电磁干扰，受限于电压损失，限流水平受到一定限制。

高压限流熔断器　分为高压限流熔管和混合式高速开断器两类。高压限流熔管的熔丝由呈螺旋状态排列的导体条组成，密封在石英砂填充的热阻陶瓷管内部，在故障电流作用下，熔丝多点融化，产生足够的弧电压，以限制故障电流，直至导体断裂、切断故障电流。其额定电流较小，仅适合保护配电变压器或小容量支线等设备。混合式高速开断器由主电路和限流熔丝并联构成，利用电流传感器和电子测控装置检测判断短路故障，利用炸药爆炸高速开断主电路，迫使短路电流转移到并联的灭弧熔断器支路上，完成限流和分断。其主要优点是额定电流大、功耗低、限流能力强，开断速度快，可以小于 5ms，但仅能一次性开断，需外接可靠电源。

热敏电阻故障限流器　一种非线性电阻，室温时电阻值非常低，当故障电流流过时，材料发热升温，在温度升高到一定值时，电阻值在微秒时间内提高 8～10 个数量级，从而起到限制故障电流的作用。由于单个热敏电阻元件的电压与

电流额定值不高，且存在电阻受外界因素影响大、电阻恢复时间长等缺陷，热敏电阻故障限流器主要在低压系统中获得应用。

电力电子故障限流器 可分为非超导型和超导型两种。

非超导型故障限流器 主要有谐振型故障限流器和固态故障限流器。

谐振型故障限流器分为串联谐振与并联谐振两种类型。①串联谐振故障限流器利用电力电子器件使正常工作时处于串联谐振（阻抗接近0）状态下的电路在出现短路故障时脱谐，使阻抗增大而达到限制短路电流的目的。图1给出了串联谐振故障限流器原理图，正常运行时晶闸管（SCR）不导通，电感L与电容C发生串联谐振，装置阻抗为零。系统出现短路时，SCR导通，电抗器串入电路起到限流作用。串联谐振故障限流器简单、可靠，已在中压配电网中获得应用。②并联谐振故障限流器正常工作时在电力电子器件控制下处于非谐振状态，阻抗较小，而在系统出现短路故障时进入并联谐振（阻抗）状态，使线路阻抗增大而限制短路电流。这种故障限流器容量有限，实际系统中应用较少。

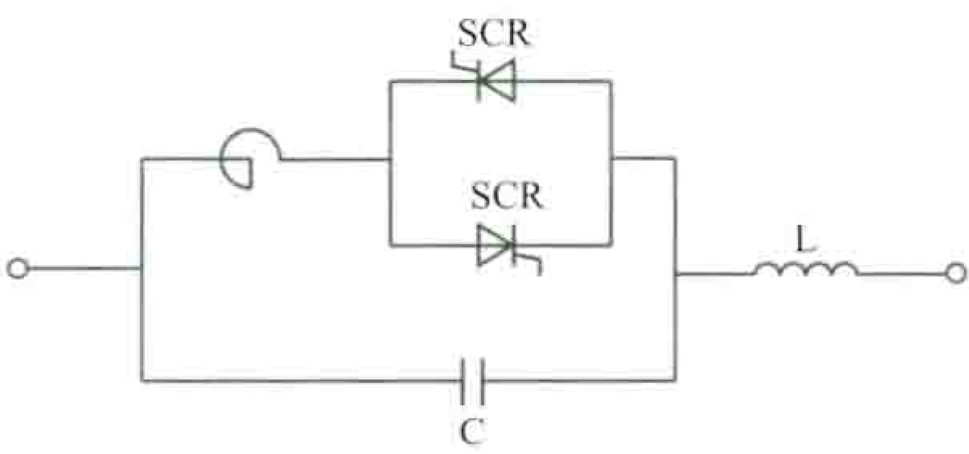


图1 串联谐振故障限流器原理图

固态故障限流器由电力电子器件和限流电抗器构成，能够在峰值电流到达之前的电流上升阶段就中断故障电流。图2给出了一种固态故障限流器的原理。正常工作时，可关断晶闸管（GTO）导通流过负荷电流，对系统运行无影响。当检测到故障电流后，GTO被关断，电流转移到限流电抗器上，从而限制了故障电流。



图2 固态故障限流器原理图

随着电力电子技术的发展，固态故障限流器技术愈来愈成熟，已在中低压配电设备中获得应用。

超导型故障限流器 简称SD-FCL（superconductor D-FCL），是利用超导体在由超导转换为正常状态后阻抗增大的特性来限制故障电流，它有多种实现方式，包括电阻型SD-FCL、桥路型SD-FCL、变压器型SD-FCL、饱和型SD-FCL等。

电阻型SD-FCL由高温超导（high temperature superconductor，HTS）线圈与并联的普通线圈构成。正常运行时，线路电流全部通过处于超导状态的HTS线圈。出现短路故障时，因流过HTS线圈的电流超过其临界值而呈现高电阻，电流被转移到普通线圈上去，达到限流目的。

桥路型SD-FCL原理如图3所示，它由二极管VD1～VD4、HTS线圈和直流偏压源Vb组成。调节Vb使流过HTS线圈的电流大于线路额定电流峰值。正常运行时，桥路始终导通，HTS线圈两端电压为零。一旦发生短路故障，HTS线圈失超转变为高阻状态串入线路中限流。

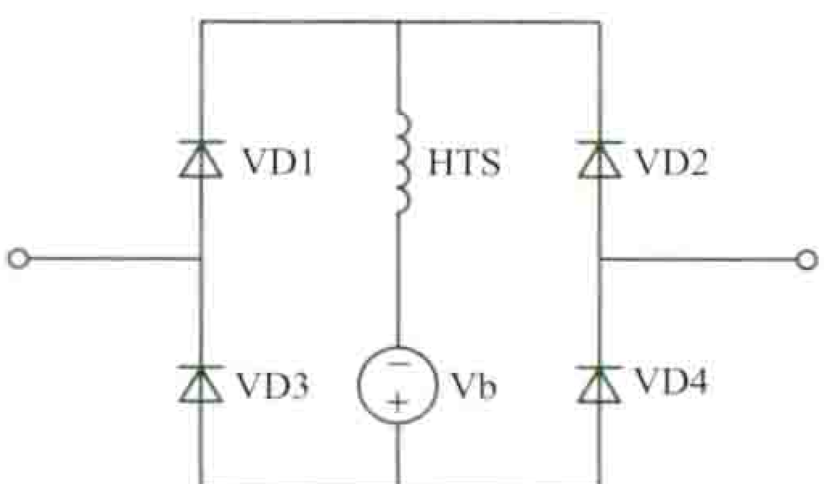


图3 桥路型SD-FCL原理图

变压器型SD-FCL由通过线路电流的一次侧线圈、二次侧短接的高温超导线圈和铁芯组成。正常运行时，超导线圈阻抗为零，变压器因二次侧被短接而呈现低阻抗。故障时，超导线圈因变压器二次侧电流很快超过其临界值而失超，二次侧电阻瞬间变大，导致变压器一次侧的等效阻抗很快增大，从而限制故障电流的增加。

饱和型SD-FCL是一种非失超型的限流器，由铁芯、一次交流线圈、二次直流HTS线圈及直流偏置电源等组成。当额定交流电流通过一次线圈时，选择合适的直流偏置电源使两个铁芯均处于深度饱和状态。而当出现故障时，瞬间增大的电流使交流线圈在铁芯中产生的磁动势接近于直流磁动势，使两个铁芯分别在正负半波退出饱和，系统呈现高阻抗，起到限流的作用。

展望 应用D-FCL可以降低配电设备耐受短时电流的要求，提高供电质量，降低配电网的投资，减少分布式电源并网投资等。随着电力电子技术特别是大功率晶闸管技术的发展，基于电力电子技术的故障电流限制器将较快得到推广应用，而串联谐振式故障电流限制器具有一定应用优势，未来的智能配电网，D-FCL将获得普遍应用，配电系统短路电流水平将大幅降低、危害大幅减轻，传统的大遮断容量断路器将大量减少，配电网性能与保护控制方式将发生较大变化。

peidianwang guangyu baohu

配电网广域保护 （wide-area protection for distribution networks） 利用多个（3个及以上）站点的测量信息实现的配电网继电保护方式。它建立在保护装置相互之间或保护装置与控制主站之间的快速实时通信基础上，能够克服传统保护仅利用本地信息的局限性，简化保护的配合，提高保护的自适应能力，是配电网保护技术的重要发展方向。具有对故障进行快速、可靠、精确地切除与控制的特点。

实现方式 有集中控制与分布式智能控制两种实现方式。

集中控制式广域保护 由控制子站集中采集、处理保护装置的测量信息，进行保护控制决策并将保护控制命令下发至保护装置予以实施。集中控制式广域保护系统构成如图1所示，由保护装置、控制子站与通信网络组成。保护装置安装在现场开关处，采集并上传测量数据，同时接收控制子站下发的保护控制命令。实际工程中，保护装置同时具备基于就地测量信息的保护功能，并且还可以将其设计成配电网综合自动化终端，同时完成配电网自动化测量与控制功能。控制子站是系统的核心，除完成广域保护集中控制功能外，还可与配电网自动化系统主站

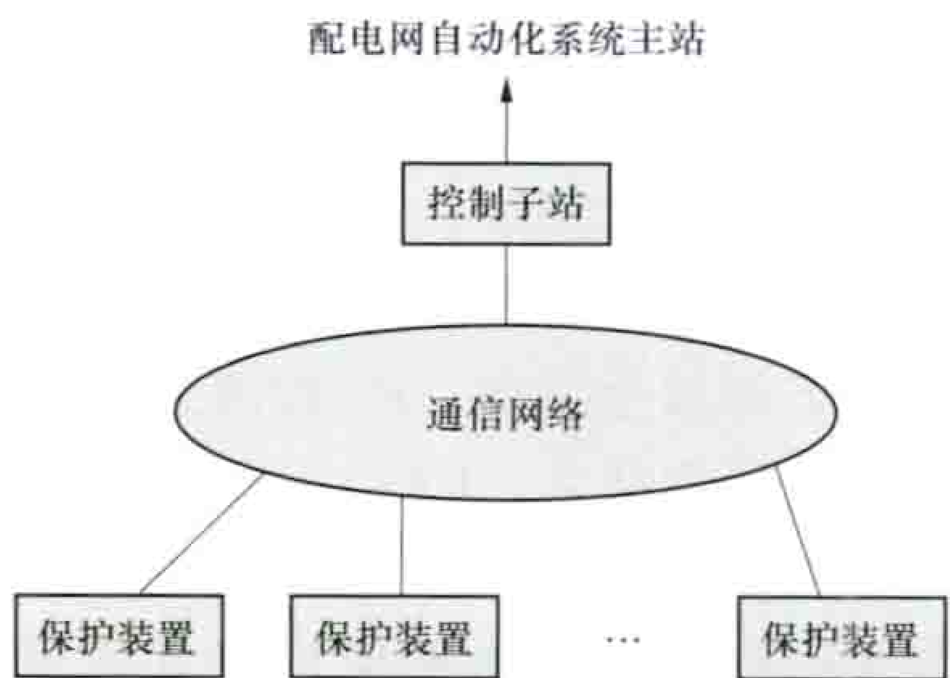


图1 集中控制式广域保护系统构成

通信，上传故障与保护动作信息。控制子站可与配电网自动化系统子站复用，将广域保护作为配电网自动化系统子站的一个高级应用功能。通信通道完成保护装置与控制子站之间的实时数据传输功能，既可以是点对点串行通道，也可以是点对点对等通信网络。广域保护对数据传输的实时性有严格要求：主保护数据传输延时不应大于10ms，后备保护数据传输延时不应大于40ms。当广域保护数据与配电网自动化数据共用通信网络时，需要采取措施保证保护数据传输的实时性与可靠性。

集中控制式广域保护的控制子站能够获取全面的配电网运行与故障信息，保护算法的设计相对简单。其缺点是保护装置与控制子站之间的数据传输量大，对通信通道的依赖性强；需要安装专门的控制子站，其故障会导致整体保护功能的丧失或不正常。

图2所示辐射式馈线，可采用集中控制式广域电流保护，其工作原理是：控制子站通过集中采集并比较三级断路器（QF1、QF2、QF3）处保护装置（P1、P2、P3）的过电流检测结果来定位故障区段，向故障区段上游保护装置发出跳闸命令切除故障。假设在第一个区段上F点发生故障，P1检测到过电流现象，而P2、P3则没有。P1向控制子站发出保护启动信号，控制子站接到P1的保护启动信号后启动广域电流保护程序，集中采集并比较P1、P2、P3的过电流检测结果，判断出故障发生在第二区段上，然后向P1发出跳闸命令。如果控制子站与保护装置之间的通信延时在10ms以内，现场保护装置将完全能够在100ms以内发出跳闸命令，快速切除故障；而采用传统的阶段式电流保护时，三级保护之间通过动作延时进行配合，P1将出现2个时间级差的动作延时（大于0.6s）。

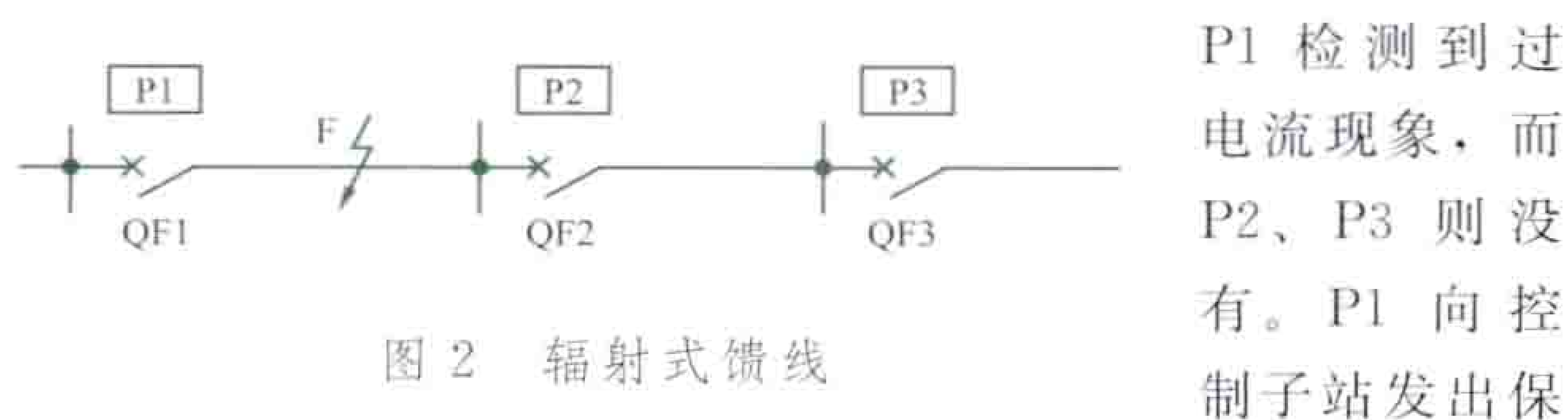


图2 辐射式馈线

分布式智能控制广域保护　保护装置自行处理当地直接测量的信息与通过通信网络获取的相关保护装置的测量与控制信息，进行保护控制决策并直接向所监控的开关发出动作命令。

分布式智能控制广域保护不需要控制子站的参与，系统结构简单、成本低，实时性好，但要求保护装置具有比较强的实时数据处理能力，能够支持广域保护高级应用软件，而且保护装置之间需要交换测量与控制信息，必须采用点对点对等通信网络。

图2所示辐射式馈线，如果采用分布式智能控制广域电流保护，检测到过电流的现场保护装置首先与下级相邻保护装置交换过电流检测信息，保护装置根据自身与下级相邻装置的过电流检测结果，判断其下级相邻区段是否出现故障，并在相邻区段出现故障时发出跳闸命令。仍假设在第一个分段上F点发生故障，P1检测到过电流现象后，向P2请求其过电流检测结果，P2向P1返回没有检测到过电流的信号，P1判断出故障在其下级区段上，向其所控制的断路器QF1发出跳闸命令。如果保护装置之间的通信延时在10ms以内，也完全能够在100ms以内发出跳闸命令。

发展与展望　广域保护的研究兴起于20世纪90年代末，主要集中在输电网安全稳定控制方面与后备保护方面。广域保护在配电网中的应用，总体还处于起步阶段。而配电网故障影响范围有限，故障处理涉及的站点比较少且一般分布在一个数千米的范围内，通信网络的设计相对容易，因此，特别适合于广域保护的应用。配电网广域保护主要研究内容与发展前景：①将建立起完善的配电网广域保护体系，包括广域电流保护、广域电流方向保护、广域电流相量比较保护、基于开关变位信息与电压相量比较的反孤岛保护等；②解决保护算法与整定值随着配电网运行结构与参数变化的自适应调整问题；③研究基于IEC 61850变电站通信协议体系的保护信息模型，解决保护装置互通互联与即插即用问题；④广域保护系统与配电网自动化系统高度融合，共享通信网络、现场终端与控制子站。

peidianwang guihua

配电网规划　(distribution network planning)　配电网未来发展的总体计划。其目的在于以适当的投资增加配电网的供电能力，适应分布式发电接入及负荷增长的需要，改善配电网的供电质量。配电网规划包括对原有配电网的改造和扩建（可称为配电网的改造规划或扩建规划）以及兴建新的配电网两个方面。配电网规划主要包括规划年限的确定、规划内容的确定、规划的编制、技术经济分析以及规划实施和评估等。

规划年限　配电网规划方案适用年限。按照规划年限的不同配电网规划可分为近期规划、中期规划和远期规划（20年）3种。配电网规划的年限应与城乡国民经济和社会发展规划的年限一致，近期宜为5年，中期宜为10年，远期宜为15年及以上。

规划内容　根据负荷预测结果，在各种技术原则指导下，结合现有电力网络的实际情况，高、中压配电网的远期和中期规划主要确定：①待建的和扩建的35～110kV变电站和220kV终端变电站的容量和位置；②上述变电站的高压进线路径和接线；③上述变电站的供电范围、二次侧出线的安排和每条出线的供电区域；④高压、中压配电网布局的电气计算，包括有功功率平衡、无功功率平衡、电压水平、线路损耗、供电可靠性等；⑤分期建设的工程项目、投资，主要设备的规范和数量估算；⑥提出必要的多种方案做技术经济比较。

近期规划应解决配电网当前存在的主要问题，通过网络建设、改造和调整，提高配电网供电的能力、质量和可靠性。近期规划应提出逐年新建、改造和调整的项目及投资估算，为配电网年度建设计划提供依据和技术支持。

中期规划应与地区输电网规划相统一，并与近期规划相衔接。重点选择适宜的网络接线，使现有网络逐步向目标网络过渡，为配电网安排前期工作计划提供依据和技术支持。

远期规划应与城市国民经济和社会发展规划及地区输电网规划相结合，重点研究城市电源结构和网络布局，规划落实变电站站址和线路走廊、通道，为城市发展预留电力设施用地和线路走廊提供技术支持。

此外，配电网规划的内容还应该包括为达到规划目标对上级电网提出的电源建设要求、调度通信及自动化方面的措施等，即针对二次系统的配置等要求。

规划编制　配电网规划的编制主要由当地供电部门负责，结合城乡规划和电力系统规划进行。高压配电网规划和地（市、州）城市中低压配电网规划一般由地（市、州）供电企业负责编制，县级中低压配电网规划由县级供电企业在上级供电企业的指导下负责编制。

规划编制的主要流程和主要内容包括：①资料收集；②配电网现状分析；③电力需求预测及分布情况；④电源规划情况分析；⑤电力电量平衡情况分析；⑥确定规划技术原则；⑦根据配电网现状、近期负荷预测及上级电源点近期规划，经过分析计算，编制近期的分年度规划；⑧根据配电网近期规划、中期负荷预测及上级电源点中期规划，经过分析计算，编制中期规划；⑨完成市政远景（饱和）规划的地区，还应编制相应的配电网远景（饱和）规划；⑩编制规划报告。

国内外部分大城市供电部门已采用计算机辅助城市配电网的规划设计，在节省人力和时间的同时，保证了分析结果的正确性。所开发的辅助规划系统，以强大的配电网信息数据库为基础，主要包括负荷分块预测、变电站和配电站位址和数量的确定、线路路径的选择、网络的电气分析计算、可靠性分析、技术经济分析评价等功能模块。

技术经济分析　配电网规划中，一般需考虑多个方案，对各个方案进行技术经济比较与分析后，选取其中的最佳方案。技术经济比较应遵循方案间的可比性，即考察时间段及计算期的可比性、收益与费用的性质及计算范围的合理性和可比性、方案风险水平的可比性等原则，因此在方案比较时，各方案中的所有费用和效益都应该考虑时间因素，只有将不同时期发生的费用和效益折算为现值，才具有可比性。由于参与比较的规划方案条件一般相同，可采用年费用最小法，以年费用最小方案为最佳方案，考虑技术经济综合性能后，可考虑采用单位投资的技术指标改善度为方案比较依据，如单位投资的供电能力改善度指标等，以取得供电部分和全社会的最大综合经济技术效益为选取最佳方案的标准。

规划实施　配电网规划应与城乡规划和建设部门密切配合，统一安排实施。配电网规划具体要通过年度计划来实现。年度计划以近期规划为依据，由于负荷预测的不确定性或政策变化，可根据当年的具体情况做必要的调整。年度计划内容包括当年投产工程、在建工程和前期工程三方面，相互间有一定的比例，做到工程有储备，以保证规划项目在实施上的相互衔接。

peidianwang guodianya baohu

配电网过电压保护　(overvoltage protection of distribution networks)　对配电网出现的过电压采取抑制的保护措施。过电压是指超过正常运行电压的幅值范围并可能使电力设备绝缘损坏的电压升高，按其成因分为外过电压和内过电压。外过电压是由大气中雷云放电引起的，也称为雷电过电压或大气过电压。内过电压是电力系统运行中由于正常操作、故障发生及消失或其他原因，使系统参数发生变化，引起电网内部电磁能量振荡、积聚或传递引起的电压升高。由于配电设施本身的绝缘水平较低，发生过电压时容易损坏设备，甚至威胁人身安全，为此，必须加强配电网的过电压保护。(见暂时过电压、瞬态过电压)

配电网雷电过电压保护　配电网及其设备为免遭雷击侵害而采取抑制的保护措施。配电网设备数量多且地域分布广，容易遭受雷击。其主要设施的防雷包括架空配电线路、配电变压器、柱上断路器以及其他设施的防雷。

架空配电线路防雷　架空配电线路绝缘水平不高，遭受直击雷或感应雷时都容易引起绝缘子的闪络，造成相间短路、线路跳闸，有时还会发生断线。特别是架空绝缘导线在遭受雷击时，由于受绝缘层影响，热量难以散发，高温电弧容易引起故障部位温升过高而烧断导线，其断线的概率比裸导线线路要高。架空配电线路防雷措施主要有适当提高线路及设备的绝缘水平、装设自动重合闸、降低杆塔接地电阻、安装线路避雷器以及架设避雷线等。

适当提高绝缘水平，采取增加绝缘子片数或增大爬距的措施，以增大冲击放电电压，提高耐雷水平，也可使绝缘子平均运行电压梯度减小，建弧率降低。装设自动重合闸是降低雷击事故率的有效措施。降低杆塔接地电阻是提高线路耐雷水平的有效方法。安装线路避雷器是提高线路防雷水平、减少断线几率的有效措施，但需要增加投资，所以一般在强雷电区域每隔 3～5 档装设一组，或装设在架空绝缘导线与架空裸导线连接处、与电缆连接处、进入变电站处等。架设避雷线是高压配电线路防雷的基本措施，但对于 35kV 以下线路，架设避雷线防止直击雷的作用不大，一般不全线架设避雷线。如果在雷击跳闸率很高的情况下需全线架设避雷线，应进行技术经济综合比较后再定。

架空配电线路的防雷措施要综合考虑线路所处区域雷电活动强弱、地形地貌条件（如地质结构、土壤电阻率的高低等）、线路运行方式和运行经验、线路负荷性质及负荷的重要性等因素，采取合理的防雷措施，使线路具有技术上可行、经济上合理的耐雷性能，降低线路的雷击跳闸率。

配电变压器防雷　配电变压器是配电网的重要设备，为防止雷击损坏配电变压器，其高低压两侧都需安装阀式避雷器来保护，典型接线如图 1 所示。避雷器要求尽量靠近变压器安装，距离越近，保护效果越好，一般安装在高压熔断器的内侧。高、低压避雷器的接地线应和配电变压器的金属外壳及低压中性点连在一起共同接地，俗称“四点共地”。在此接地方式下，当高压侧避雷器动作放电时，因避雷器紧邻变压器高压套管安装，变压器绝缘上所承受的电压可认为是避雷器的残压，而雷电流通过接地装置时的电压降并没有作用在变压器的绝缘上，这对保护变压器的安全是十分有利的。以容量大小及重要性为出发点来考虑，变压器的容量为 100kV・A 及以上时，其接地电阻要求降低到 4Ω 以下；变压器的容量小于 100kV・A 时，其接地电阻能做到 10Ω 以下即可。

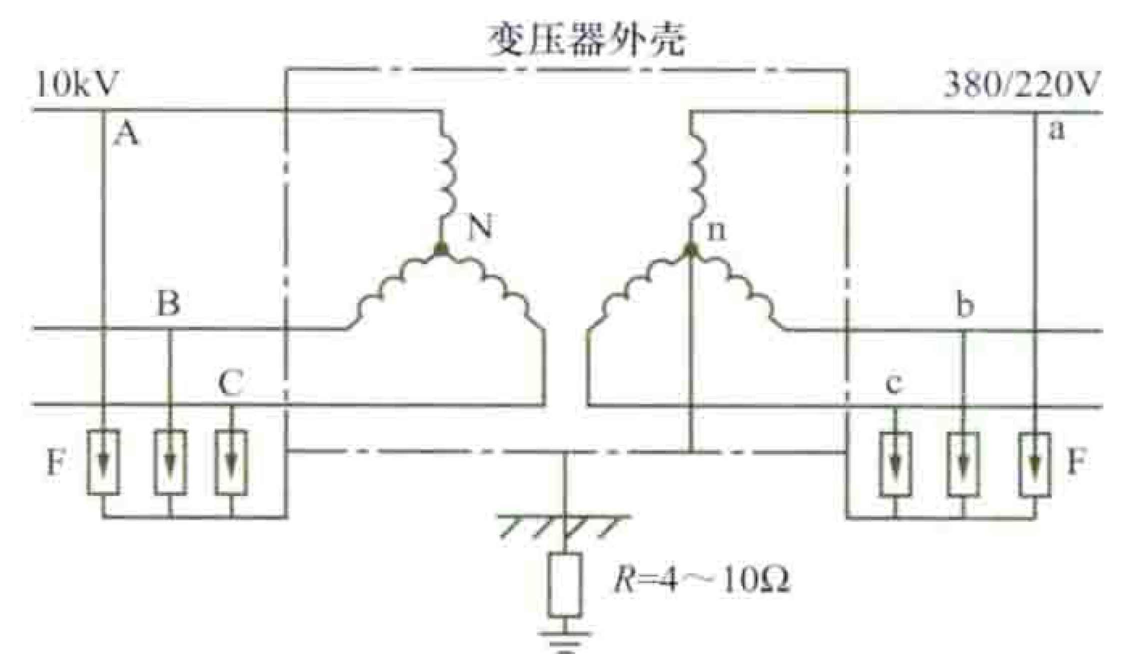


图 1　配电变压器防雷接线图

当配电变压器绕组采用 Yyn 接线方式时，高压侧绕组中性点不引出，而低压侧为三相四线制，其额定电压为

380/220V。在配电变压器上可能出现正变换过电压和反变换过电压两种情况，如图 2 所示。

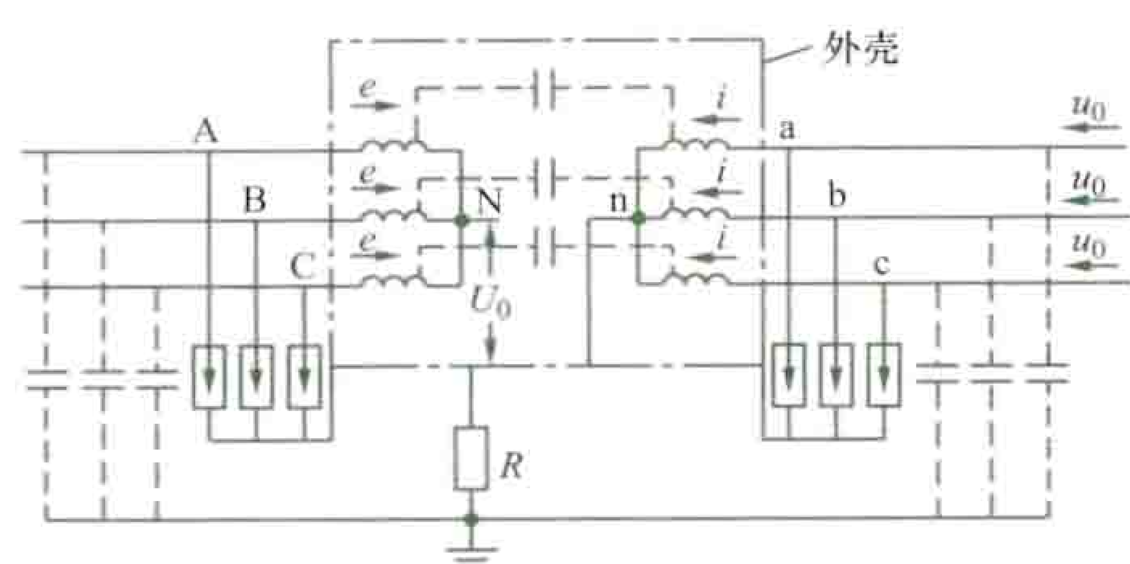


图 2　变换过电压原理图

正变换过电压是指配电变压器低压侧的过电压通过变压器高、低压绕组间的电磁耦合按变压器的变比变换到高压侧形成高压侧的过电压。由于配电变压器高压绕组的绝缘裕度比低压绕组低，因此可能出现变压器低压侧落雷，低压绕组未损坏而高压绕组因正变换过电压而损坏的现象。

反变换过电压是指配电变压器高压侧受雷击造成高压侧避雷器动作放电后，流经避雷器的雷电流 I_1 在接地电阻 R 上产生的电压降 I_1R 作用到配电变压器低压侧绕组的中性点上并引起三相绕组电压同时升高，同时通过高、低压绕组间的电磁耦合按变比使高压绕组形成过电压。若低压侧未装设避雷器，还将使高压侧绕组的中性点出现过电压，危及中性点附近的主绝缘，也可能使纵绝缘被击穿。配电变压器低压侧装设避雷器能有效地限制反变换过电压。

柱上断路器防雷　柱上断路器是配电线路上较为重要的设备，由于其绝缘水平较低，极间距离也很小，往往由于雷击引起闪络短路的事故，因此必须用避雷器保护。对于经常处于开路运行而两侧均带有电压的柱上断路器，必须在其两侧都加装避雷器保护。避雷器的接地引下线要求和柱上断路器的金属外壳连在一起共同接地，接地电阻应在 10Ω 以下。配电线路常开运行的隔离开关亦同样必须在其两侧都加装避雷器保护。

其他设施防雷　电缆终端和架空线路相连，亦应采用避雷器保护，其接地引下线还需和电缆的金属外皮相连接，接地电阻要求做到 10Ω 以下。

低压供电的重要用户，在低压线路进入建筑物前安装一组低压避雷器，必要时在室内亦加装一组低压避雷器，接地电阻要求做到 10Ω 以下。一般的低压用户可采用较为简易的保护措施，即将低压线进屋前电杆上的绝缘子铁脚进行接地，其接地电阻要求做到 30Ω 即可，对钢筋混凝土电杆埋在地下的自然接地作用亦应加以利用。

配电网内过电压保护　内过电压可分为操作过电压和暂时过电压。操作过电压是由于配电网内部操作（拉闸或合闸）和故障（断线或接地）引发的过电压，常见的有电弧接地过电压、开断电感性元件（空载变压器、电抗器、电动机等）过电压、开断电容性元件（空载线路、电容器组等）过电压、空载线路合闸过电压等。操作过电压即电磁过渡过程中的过电压，一般持续时间在 0.1s 以内。暂时过电压包括谐振过电压和工频过电压，是在暂态过程结束后出现的具有稳态性质的过电压，如不采取措施可能会长期存在。谐振过电压是由于配电网中电感、电容参数配合不当而出现的各种持续时间较长的谐振现象及电压升高，常见的谐振过电压有线性谐振过电压、铁磁谐振过电压、参数谐振过电压等。工频过电压是指在正常或故障时出现的幅值超过最大工作相电压、频率为工频或接近工频的电压升高。

在配电网较常发生的是间歇性电弧接地工频过电压。在中性点不接地中压配电网发生单相接地时，流过故障点的电流为电容电流，因电容电流的相角超前电源电压 90°，当电容电流过零时，故障点的电弧熄灭，而此时故障点的电压正好为最大值，如果接地电容电流较大，有可能使故障点刚刚自熄的电弧重新点燃，线路上的电荷重新分配，对地电压再次发生剧变，出现交替再熄再燃的间歇性电弧，导致电磁能的强烈振荡，故障相、非故障相和中性点都产生过电压。这种间歇性电弧接地过电压波及面广、能量大、持续时间长且危害性很大，尚没有专门的设备能够有效抑制这种过电压。对保护设备，如避雷器，要么避开它，在这种过电压出现时避雷器不动作（加串联间隙）；要么允许在这种过电压出现时使避雷器击穿损坏。最好的办法是避免间歇性弧光接地过电压发生，为此，若中压配电网电容电流超过 10A 时，其中性点可采用：①消弧线圈接地方式。补偿后接地点残余电流小于 10A。②电阻接地方式。在接地故障点加注阻性电流，使故障点成为以阻性电流为主的阻容性电流。其相角超前电压小于 45°，在电流过零熄灭时，故障点间隙的恢复电压不高，不足以使间隙复燃。

peidianwang huanbao guanli

配电网环保管理　(environment protection management of distribution networks)　协调配电网与环境的关系，减少其对环境与人类的不良影响的管理活动。主要包括配电设备噪声控制、电磁辐射控制、有害气体泄漏控制和配电设施与环境的协调等。

噪声控制　降低配电设备引起的环境噪声水平的措施。产生噪声的配电设备主要是配电变压器，其噪声包括电磁噪声以及冷却风扇产生的噪声。配电变压器的噪声控制措施主要有：①选择噪声水平低的变压器。变压器本体噪声应在 50dB 以下，最好不采用冷却风扇冷却。②合理选择变压器安装位置。户内配电所的配电变压器不要直对大门或通风百叶窗等部位，应保持 2m 以上距离。③在变压器与地坪间安装减振装置，以降低变压器振动噪声。④避免变压器运行在过电压、过负荷状态并安装谐波滤波装置，以减少配电变压器的电磁噪声。

电磁辐射控制　降低配电设备引起的环境电磁辐射水平的措施。主要包括：①将城市繁华地区的高压架空配电线路改为地下电缆线路。②在配电所、开闭所与箱式变电站的设计中尽量少选分相设备。即使非选不可亦应尽量缩小相间距离，以最大限度抵消各相设备产生的电磁场。③提高配电设施建筑的电磁屏蔽能力。在户内配电所、开闭所房屋结构设计中充分利用土建的金属结构钢筋，选用截面较大的主筋进行连接，形成金属屏蔽护网，同时辅以增加接地极数量及接地金属网的截面等，以经济有效地减少对外的电磁辐射。

有害气体泄漏控制　防止 SF_6 绝缘开关设备、全封闭组合电器 SF_6 气体的泄漏以及降低 SF_6 气体对工作人员的影响。SF_6 气体的密度是空气的 5 倍，通常沉积于电缆沟等低洼处或接近地板的低层空间。按规定空气中 SF_6 气体含量不能超过 1000μL/L，否则，将对工作人员的健康不利。高压

室内新上开关设备宜采用固体绝缘，尽量避免使用SF_6绝缘设备；在已采用SF_6绝缘设备的高压室内，通风用取风口应布置在变电站下部，以提高通风换气效率。

配电设施与环境的协调　配电设施的外观要与邻近建筑的外观协调，包括建筑风格、外墙装饰材料及颜色等。特别是建于城市中心繁华地区的配电所、箱式变电站、环网柜更需要重视这一问题。

peidianwang jidian baohu

配电网继电保护　(protective relaying of distribution networks)　检测配电网故障或异常运行状态，向所控制的断路器发出切除故障元件的跳闸命令或者向运行人员发出告警信号的自动化措施与装备。其作用是消除或减轻故障对配电网及其元件的危害，避免故障引起的停电或缩小故障停电范围。因早期的保护装置采用电磁型继电器构成，因此沿称继电保护。

配电网继电保护装置　通常分为动作于配电网故障的继电保护装置与动作于配电网异常运行状态的安全自动装置两大类。配电网中应用的继电保护装置主要包括电流保护装置、电流差动保护装置、小电流接地选线装置等；安全自动装置主要包括低频减载保护装置、低压减载保护装置、配电网自动重合闸装置、电源备自投自动装置。继电保护与安全自动装置是保证配电网安全运行与可靠供电的基本装备，其动作特点是非调节性的（即突然投入或切除某一元件），并且要求快速动作。

装置的构成包括测量、逻辑判断、执行三部分。经历了由电磁型机械元件构成的电磁型、整流二极管构成的整流型、半导体分立元件或集成电路构成的静态型与微处理器构成的微机型装置四个发展阶段。现代保护装置硬件采用高性能微处理器、数字处理芯片与大规模集成电路，软件设计以实时多任务操作系统为基础并采用模块化结构，其功能以及可靠性与管理维护的方便性不断提高。

配电网继电保护原理　继电保护装置采集并处理配电元件的运行参数（如电流、电压等），提取故障量并进行状态判别，在配电网元件故障或出现异常运行状态时，发出跳闸命令或告警信号。包括配电网电流保护、熔断器保护、配电线路纵联保护、配电网广域保护、非有效接地系统单相接地保护、分界开关保护、分布式电源并网保护、配电网自动重合闸等。

故障量是用来判别电力元件故障或电网异常运行状态的物理量，随被保护对象不同而异。线路与配电变压器保护普遍使用工频电气量作为故障量，如反应工频电流显著增加的过电流保护。对于双端供电的线路，还借助连接两端变电站或开关的通信通道，相互传输物理量或继电保护行为信息，实现对线路的保护。对于油浸式配电变压器，可以用油中气体含量作为故障量，构成气体保护。对于低频减载保护，通过检测母线电压的频率绝对值下降或频率变化率为负来判断电力系统是否趋于频率崩溃；而低压减载保护则通过检测电压绝对值的下降来判别系统是否出现严重的无功缺额或趋于电压崩溃。利用故障产生的暂态量作为判据的保护已研制完成。(见非有效接地系统单相接地故障选线)

配电网继电保护的基本要求　包括可靠性、快速性、选择性、灵敏性四个方面，此外还应考虑经济性。①可靠性。包括可信赖性和安全性。可信赖性要求保护装置在设计要求其动作的情况下能够正确地完成动作，安全性要求在非设计要求其动作的其他所有情况下可靠地不动作。②快速性。以允许的可能最快的速度反应故障并发出断路器跳闸命令。动作速度越快，为防止误动采取的措施越复杂，成本也相应地越高，因此，在配电网中，往往根据故障及其影响的严重性允许带有一定的延时动作。③选择性。仅将故障元件从电网中切除，使无故障部分继续运行，尽量缩小停电范围。④灵敏性。保护装置对于其保护范围内发生故障或不正常运行状态的反应能力，通常用灵敏系数衡量。⑤经济性。在满足配电网安全运行与供电质量要求的前提下，合理配置、选型继电保护装置，以尽量降低投资与管理维护成本。

配电网继电保护的特点　①保护原理与配置相对简单，并不追求超高速动作（如动作时间在一周波以内）。因为配电网多采用辐射形供电方式，网络结构比较简单，其故障一般不会对电力系统的稳定运行产生实质性威胁。②采用集继电保护与测控功能于一体的综合自动化装置，简化二次回路，减少投资与管理维护工作量。

展望　未来配电网继电保护装置及其配置将更为完善，以尽可能地减少故障引起的停电与电压暂降给用户带来的损失，如部署分界开关保护以避免用户侧支线故障引起主干线路停电；应用纵联保护以避免线路末端故障时延时跳闸造成的长时间电压暂降。继电保护装置与其他测量控制与自动化功能共用平台，进一步向模块化、标准化的综合自动化装置发展。装置配备网络通信接口，互相之间能够快速交换数据，实现基于分布式智能的广域保护、自适应保护。此外，还要解决分布式电源并网保护以及有源配电网故障电流双向流动带来的问题。

见《电力系统卷》电磁型继电器、电力系统安全自动装置。

peidianwang jidian baohu peizhi

配电网继电保护配置　(protection scheme of distribution networks)　配电网继电保护装置部署及其保护功能选择的方案。其原则是保护的技术性能满足要求，保护装置及其功能之间能够协调配合；在保证配电网安全的前提下，充分考虑故障对供电质量的影响，合理权衡保护装置的投资与故障给用户造成的经济损失，实现社会整体效益的最大化。具体包括馈线（10kV配电线路）、开闭所、配电变压器、配电所、箱式变电站、电容器和低压配电线路的保护配置方案。

馈线保护配置　用于中压主干配电线路的保护。通常在变电站出口断路器处配置保护装置，对于个别距离比较长的农网馈线，如果电流动作定值能够与变电站出口断路器保护配合，则可在线路中间安装具有保护功能的自动重合器或者安装断路器并配置保护装置。馈线保护的主要功能有相间短路保护、单相接地短路保护、小电流接地保护、自动重合闸等。

相间短路保护　用于馈线（配电线路）相对相或相和相对地短路时的继电保护。相间短路的电流大，由此引起的变

电站母线电压下降幅度也大，对电力元件的安全与敏感负荷的正常运行都有很大的威胁，因此，要求尽可能地快速切除故障。①辐射式馈线通常采用反应相电流的速断保护作为主保护以及过电流保护作为后备保护。速断保护一般带有动作延时（定时限，0.3～0.5s）以与下一级保护配合。为改进与下游配电变压器熔断器保护的配合，可采用反时限电流保护（见配电网电流保护）。如果因与上级主变压器保护的配合问题或受主变压器耐受短路电流能力的限制不允许速断保护带有延时，或者因同母线上馈线带有对电压暂降敏感的负荷要求快速（0s）切除故障，为保证保护动作的快速性与选择性，可采用配电线路纵联保护或配电网广域保护作为主保护。②闭环运行配电线路采用电流差动或方向比较纵联保护作为主保护，采用方向过电流保护作为后备保护。（见配电线路纵联保护）

单相接地短路保护　用于中性点有效接地系统单相对地短路故障时的保护。在中国，主要采用小电阻接地方式，其单相短路故障的故障电流一般不大于1000A，对变电站母线电压影响较小，允许以较大的延时（0.3～4s）切除故障。①辐射式馈线通常采用零序过电流保护或反时限零序电流保护，保护动作延时与下一级保护（如开闭所出线保护）配合，以防止出现越级跳闸。如采用电流差动保护作为相间短路的主保护，该保护也具有保护单相接地短路的作用。②闭环运行线路采用电流差动或零序方向比较纵联保护作为主保护，采用方向零序过电流保护作为后备保护。

小电流接地保护　用于中性点非有效接地系统单相对地故障线路指示与告警，又称非有效接地系统单相接地故障选线或小电流接地故障选线。可采用基于暂态零序电流与电压信号的接地保护。对于中性点不接地系统或者在出现接地故障时投入并联电阻，或者能够调整补偿电流的谐振接地系统，可选用检测工频零序电流幅值或变化量的保护。（见中压配电网中性点接地方式、非有效接地系统单相接地保护）

自动重合闸　用于架空配电线路或以架空配电线路为主的架空与电缆混合线路中，防止瞬时性故障造成长期停电。（见配电网自动重合闸）

开闭所保护配置　包括馈出线保护、电源备自投装置等。

馈出线保护　可选择与变电站出口断路器保护配置类似的方案。相间短路电流速断保护一般不带动作延时，以与变电站出口断路器定时限电流速断保护配合。为减少投资，亦可仅在开闭所进线侧安装断路器并配置保护。在馈出线上发生短路故障时，进线侧保护动作切除故障，然后通过配电网自动化系统远程控制或基于配电网自动化系统终端的就地控制隔离故障线路并合上进线断路器，恢复非故障线路的供电。

电源备自投装置　在进线失电时，合上母线联络开关，恢复失电侧母线的供电。需在确认进线电源开关断开后动作，以防止在进线电源发生故障的情况下由备用电源经过母线供给故障点电流。

配电变压器保护配置　配电变压器包括杆上配电变压器、配电所和箱式变电站中的配电变压器。①小容量（<800kV·A）配电变压器配置熔断器保护。户外配电变压器配置跌落式熔断器保护，户内配电变压器配置限流式熔断器保护。②大容量（≥800kV·A）配电变压器配置电流速断保护、过电流保护，油浸式配电变压器配备瓦斯保护。中性点有效接地系统配备零序电流速断保护、零序过电流保护。中性点非有效接地系统配备小电流接地保护。

配电所保护配置　①配电变压器保护；②双电源的配电所进线侧配置电源备自投装置；③具有10kV馈出线的配电所配置馈出线保护。

箱式变电站保护配置　①配电变压器保护；②双电源的箱式变电站进线侧配置电源备自投装置。

电容器保护配置　包括电网异常保护、电容器内部故障保护、电容器相间故障保护。电网异常（电容器接入处母线电压过高或失压）采用过电压保护与低电压保护；电容器内部故障采用熔断器保护或电流速断保护；电容器相间故障采用过电流保护。

低压配电线路保护配置　通常采用具有剩余电流保护、欠压保护、过电流和短路脱扣等功能的低压断路器，在线路出现漏电、欠压、过载、短路情况时自动断开。

peidianwang jiexian fangshi

配电网接线方式

（connection mode of distribution networks）　配电网中各主要电气元件的电气连接形式。

配电网接线方式基本上分为辐射形、环形以及格式三大形式。在辐射形配电网，电能只能通过单一路径从电源点送至用电点。在环形和格式配电网，电能可以通过两个及以上的路径从电源点送至用电点。格式配电网中国基本没有采用。

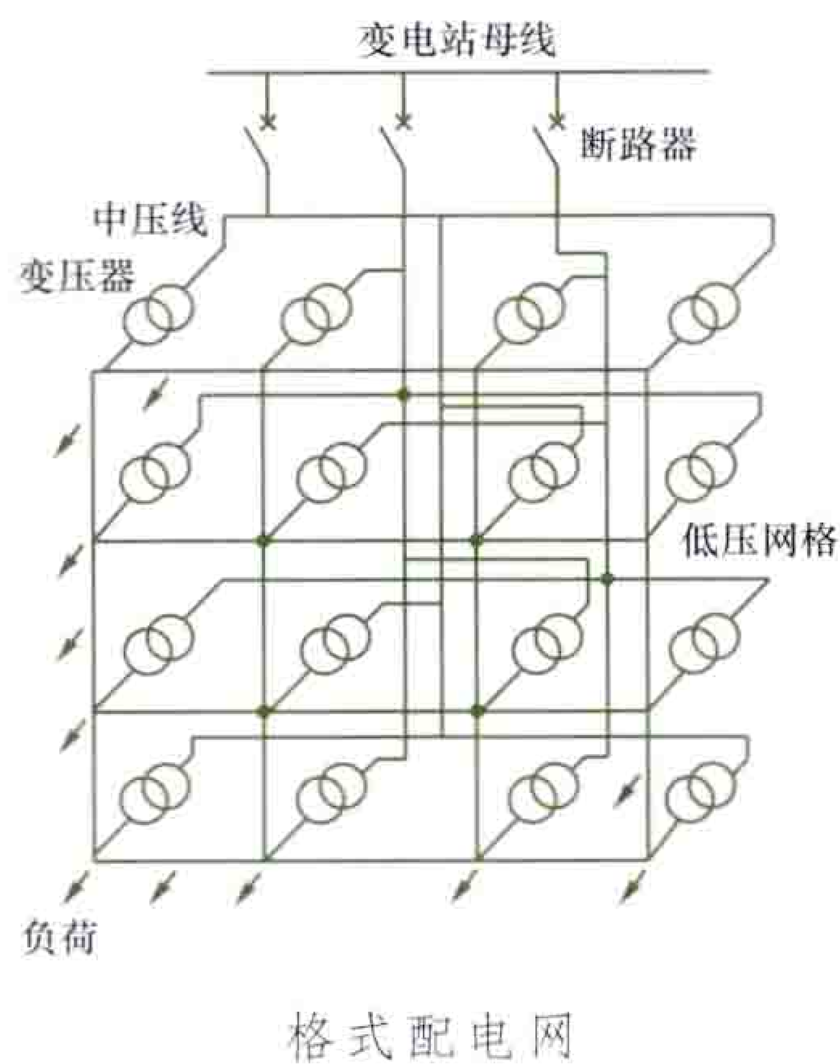
辐射形配电网　又称放射式配电网。配电馈线自配电变电站按负荷的分布情况呈辐射状引至用电点，所有用电点的电能只能通过单一的路径供给。常用的辐射形接线又有单辐射和双辐射两种形式。辐射形配电网的优点是接线简单清晰，运行维护方便，建设投资小，适用于低负荷密度区和非重要用户的供电。其缺点是当线路或设备故障、检修时会造成大量用户停电，供电可靠性较差。（见辐射形网络）

环形配电网　又称环式配电网。配电变电所引出的配电线路连接成环形，每个用电点自环内某个位置引接。环形配电网常用的接线方式可归为三类：单环网、双回（或多回）环网、多电源N供一备接线方式。架空线路通常采用单环网接线方式，单环网接线还可根据实际情况采用单电源单联络方式或双电源多联络方式等不同的接线方式，满足不同供电可靠性要求。电缆线路根据供电可靠性要求，可采用单环网、双环网或多电源N供一备接线方式。若在环形配电网上配置自动化装置，实现故障自动识别、隔离，非故障段自动恢复供电，可大大提高配电网供电可靠性。环形配电网络接线方式可以较好适应现代城市发展对供电可靠性提出的更高要求。（见环形网络）

格式配电网　自配电变电所的同一母线引出多回配电线路（一般至少3回），配电线路上的各配电变电器的低压侧均连接在一起，形成网格布置，用电点都自网上接出，任何一回配电线路或变压器停电时，用电负荷不会停电。

格式网络一般用于大城市的低压电缆配电网，由来自同

一电源但不同配电线路的多台变压器的低压电网实连或通过熔断器并联组成（见图）。例如英国伦敦的格式配电网，由4台750kV·A的配电变压器的低压电网实连为某一区域供电，再与邻近区域的实连电网用熔断器并联。低压电缆故障时，故障点由短路电源将熔件熔断而切除，除瞬时电压下降外，不影响供电。中压电缆故障时，电源侧断路器跳闸，配电变压器的低压侧断路器由反馈的励磁电流使逆功率保护动作跳闸，实现从高、低压两侧故障隔离，格式网络仍维持供电。格式配电网供电可靠性高、线损小、电压质量好，但保护复杂、建设费用高。欧美一些国家的大城市低压配电网曾大量使用格式接线，但因存在结构运行复杂、投资昂贵、保护配置复杂等问题，已不再推广。



格式配电网

peidianwang jiegou

配电网结构 （configuration of distribution network）

配电网中各主要电气元件的电气连接形式。在各种网络结构形式中，通过各个元件（包括变压器、母线、断路器、配电线路）的不同运行状态，可组成配电网在正常和异常情况下电能的各种配送方式，从而得到不同的供电可靠性、经济运行性以及调度灵活性等。研究配电网结构的目的在于分析配电网络的特点和使用要求，从而选择最适合具体地区配电网特点的网络接线形式。在选择方法上，一般需要提出多种不同的网络接线方案，进行全面的技术经济比较，并考虑工程实施上的可行性等要求，做出综合评价，确定最佳方案。

见配电网接线方式。

peidianwang shebei fanghu

配电网设备防护 （protection of distribution network equipment）

为保障配电网设备安全运行、维护公共安全而采取的防护措施。配电网及其设备受国家法律保护，禁止任何单位或个人从事危害配电网及其设备的行为。配电网设备多分布在人类活动频繁的区域，易受外界干扰、外力破坏，供电企业运行部门应根据国家电力设施保护相关法律法规，结合本单位实际情况，制定配电网设备防护措施，并定期对外力破坏防护工作进行总结分析。配电网是城乡市政设施的组成部分，供电企业运行部门负责及时收集本地区的市政规划建设、施工等信息，市政施工期间安排运行人员到现场检查防护措施，必要时进行现场监护；对未经同意在配电网线路防护范围内进行的施工行为，立即进行劝阻、制止，发送防护通知书，必要时向有关部门报告。此外，还要做好防护宣传工作，提高公民对保护配电网重要性的认识，定期组织召开防外力破坏工作宣传会，防止各类外力破坏。当发生外力破坏时，及时向有关管理部门汇报，对于造成配电网设备损坏或事故的，按有关规定索赔或提请公安、司法机关依法处理。

配电网设备防护主要包括架空配电线路的防护、配电电缆线路的防护。

架空配电线路防护 设置防护区进行防护，并装设明显的安全标志。架空配电线路的防护区是为了保证配电架空线路及其设备的安全运行和保障正常供电而设置的安全区域，即导线两边线向外侧各水平延伸5m并垂直于地面所形成的两平行面内；在厂矿、城镇等人口密集地区，防护区的区域可略小于上述规定，但各级电压导线边线延伸的距离不小于导线边线在最大计算弧垂及最大计算风偏后的水平距离和风偏后距建筑物的安全距离之和。在以下区域按规定设置明显的警示标志：①架空配电线路穿越人口密集、人员活动频繁的地区；②车辆、机械频繁穿越配电架空线路的地段；③架空配电线路上的变压器平台；④临近道路的配电电杆拉线；⑤架空配电线路附近的鱼塘；⑥配电电杆脚钉、爬梯等。此外，在架空配电线路跨越重要公路和航道时，设立标志，并标明导线距穿越物体之间的安全距离。

对于防护区内影响供电安全的物体，需进行清除，如修剪树枝、砍伐树木、清理构筑物等。修剪树木，需保证在修剪周期内树枝与导线的距离符合表中规定的数值。对下列事项可先行处理，但事后需及时通知有关单位：①为避免触电人身伤害及消除有可能造成严重后果的危急缺陷所采取的必要措施；②为处理电力线路事故，砍伐林区个别树木；③消除影响供电安全的电视机天线、铁烟囱、脚手架或其他凸出物等。

架空配电线路与其他设施的安全距离限制（m）

项目		10kV		20kV	
		最小垂直距离	最小水平距离	最小垂直距离	最小水平距离
对地距离	居民区	6.5		7.0	
	非居民区	5.5		6.0	
	交通困难区	4.5(3)		5.0	
与建筑物		3.0(2.5)	1.5(0.75)	3.5	2.0
与行道树		1.5 (0.8)	2.0 (1.0)	2.0	2.5
与果树、经济作物、城市绿化、灌木		1.5(1.0)		2.0	
甲类火险区		不允许	杆高1.5倍	不允许	杆高1.5倍

注：垂直（交叉）距离应为最大计算弧垂情况下；水平距离应为最大风偏情况下。

配电电缆线路防护 设置防护区进行防护，并装设明显的安全标志。配电电缆线路的防护区是为了保证配电电缆线路及其设备的安全运行和保障正常供电而设置的安全区域：地下电缆为电缆线路地面标桩两侧各0.75m所形成的两平行线内的区域，防护区的宽度需在地下电缆线路地面标识桩

（牌、砖）中注明；海底电缆一般为线路两侧各 2n mile[1]（港内为两侧各 100m），江河电缆一般不小于线路两侧各 100m（中、小河流一般不小于各 50m）所形成的两平行线内的水域。

地下电缆防护　在地下电缆防护区内，不得堆放垃圾、矿渣、易燃物，不得倾倒酸、碱、盐及其他有害化学物品，不得新建建筑物、开挖道路及种植树木。运行巡视人员发现电缆部件被盗、电缆工作井盖板缺失等危及电缆线路安全运行的情况时，设置临时防护措施，并向管理部门报告。在电缆拐弯、中间接头、终端和建筑物等地段，装设明显的方位标志。处于施工区域的电缆线路，设置警告标志牌，并标明防护范围。凡因施工必须挖掘而暴露的电缆，由运行人员在场监护，并告知施工人员有关施工注意事项和防护措施；对于被挖掘而露出的电缆需加装保护罩，需要悬吊时，悬吊间距需不大于 1.5m。

水底电缆防护　在水底电缆防护区内，禁止船只抛锚，并按船只往来频繁情况，必要时设置瞭望岗哨，配置能引起船只注意的标志；在水底电缆线路防护区内发生违反航行规定的事件时，及时通知有关水域的管辖部门。

peidianwang shebei jianxiu

配电网设备检修　(maintenance of distribution equipment)　为保证配电网设备健康水平，确保其安全不间断地供电而采取的必要的维修活动。包括为使设备保持原设计的性能而进行的维修工作，或根据运行条件的变更而部分改变原有设计性能的维修工作。配电网设备检修是消除设备安全隐患，保证配电网可靠运行，提高供电可靠性，确保人身安全的重要手段。图示为 110kV 冶源变电站检修现场。



110kV 冶源变电站检修现场（井玉霞　摄）

检修策略　配电网设备检修分为事后检修、定期检修和状态检修。

事后检修　设备或部件发生故障，或性能低下后进行的检修，又称修正性检修。其优点是简单易行，检修成本低；缺点是设备的局部缺陷不能及时处理可能导致整台设备的损坏，甚至引起系统故障。用于少数不重要、对系统可靠性影响不大的设备或部件的检修。

定期检修　按照预定的时间间隔或操作次数对设备或部件进行的检修，又称预防性检修。通常分为大修和小修。①大修。对配电网设备各部件进行解体检修、缺陷处理或改进，以及进行全面预防性试验，使设备恢复到原有的性能或进一步改进提高，从而保证设备在一定周期内的安全运行。②小修。消除在运行中发现的一般缺陷，重点检修易磨损部件并进行必要的处理、清扫以及对设备绝缘进行预防性试验，使设备的内、外绝缘水平和部件的功能符合安全运行的要求。定期检修的优点是可以提前发现设备缺陷；缺点是降低了供电可靠性，容易造成过度检修，检修成本较高，而且限于检修人员的技术水平，检修过程中可能造成新的缺陷。

状态检修　根据设备或部件的健康状态而进行的检修，又称预知性检修。通过先进的状态检测、评估手段，判断设备的健康状态，识别设备故障的早期征兆，对故障部位及故障严重程度、发展趋势做出判断，并根据分析诊断结果在设备性能下降到一定程度或故障将要发生之前进行检修。其优点是可以在设备故障发生之前及时发现并加以排除，避免定期检修的盲目性，提高系统的运行可靠性；缺点是初期投资较大，对运行检修人员的技术素质要求较高。

检修类别　分为 A、B、C、D、E 五种类别。

A 类检修　整体性检修，对配电网设备进行较全面、整体性的解体修理、更换。

B 类检修　局部性检修，对配电网设备部分功能部件进行局部的分解、检查、修理、更换。

C 类检修　一般性检修，对设备在停电状态下进行的例行试验、一般消缺、检查、维护和清扫。

D 类检修　维护性检修和巡检，对设备在不停电状态下进行的带电测试和设备外观检查、维护和保养。

E 类检修　设备在带电情况下采用绝缘手套作业法、绝缘杆作业法进行的检修、消缺和维护。

检修作业方式　分为不接触带电体的检修作业、停电检修作业、不停电检修作业 3 种方式。

不接触带电体的检修作业　包括配电线路的杆塔维护、铁塔下部紧固螺栓或刷漆、配电所走道清扫等作业。

停电检修作业　对需要检修的配电线路或设备停电隔离后进行检修，检修完成后再恢复供电的作业，是传统的作业方式，通常按停电计划进行。

不停电检修作业　对用户不停电而进行配电线路或设备检修的作业。主要包括：①直接对带电的配电线路或设备进行检修，即带电检修作业；②先对用户采用旁路或移动电源等方法连续供电，再将配电线路或设备停电进行检修。（见配电网不停电作业）

检修管理　包括检修计划、检修施工组织、检修验收、检修效果评估、检修年度评估等。

检修计划　为合理安排检修而做的计划，包括检修部门、班组制订的年度检修计划、季度检修计划、月度检修计划以及周检修计划，同时根据各时段检修计划提出检修所需的物资清单。检修计划要充分考虑停电的统筹安排，使每一

[1] n mile 表示海里，1n mile=1852m。

次停电都尽量结合基建工程、大修工程、技改工程等进行，保证供电可靠性。

检修施工组织　根据检修计划制定的检修前的准备工作。包括编制检修施工作业计划，办理停电检修设备的停运报批手续，制定施工组织措施、技术措施和安全措施，做好场地、作业范围布置，组织对全体作业人员的技术交底。

检修验收管理　检修结束后，验收方对照检修项目、检修记录和有关资料进行验收，并填写标准化的验收卡，保证验收项目的完整性。通常验收实行业务主管职能部门、生产车间（工区）、班组三级验收。

检修效果评估　对检修中发现的问题、检修工艺、检修效果进行总结评价，包括设备检修的技术评价、经济评价以及设备检修后的状态评价、对同类设备的状态评估等。

检修年度评估　综合年度设备完好率、设备事故率、供电可靠性、检修成本变化、设备状态评估结果等方面，对年度检修工作进行全面、客观的评价，并对检修管理提出改进意见。

参考书目

李天友，金文龙，徐丙垠．配电技术．北京：中国电力出版社，2008.

peidianwang shebei xunjian

配电网设备巡检　（perambulation inspection of distribution equipment）　为掌握配电网设备运行状况及其周围环境变化而进行的巡视检查（简称巡视）工作。通过巡视，及时发现配电网设备的缺陷、隐患或故障，并采取相应措施及早予以消除，预防事故发生，确保设备安全运行，提高供电可靠性。供电企业运行单位结合设备运行状况和气候、环境变化情况以及上级生产管理部门的要求，制定切实可行的管理办法，编制计划并合理安排线路、设备的巡视工作，上级生产管理部门对运行单位开展的巡视工作进行监督与考核。

巡视分类　分为定期巡视、特殊巡视、夜间巡视、故障巡视和监察巡视。

定期巡视　由配电网运行人员按照预定的时间周期进行，以掌握设备及设施的运行状况、运行环境变化情况为目的，及时发现缺陷（见配电网设备运行管理）和威胁配电网安全运行情况的巡视。定期巡视的主要范围：①架空线路、电缆及其附属电气设备。②柱上配电变压器、柱上开关设备、开闭所、环网单元、配电所、箱式变电站等电气设备。③防雷与接地装置、配电网自动化系统终端、直流电源、柱上电容器等设备。④架空配电线路与配电电缆线路通道内的树木、违章建筑及悬挂、堆积物，周围的挖沟、取土、修路、开山放炮及其他影响安全运行的施工作业等。⑤电缆管、沟（隧道）及相关设施。⑥开闭所、环网单元、配电所的建筑物和相关辅助设施。⑦各类相关的运行、警示标志及相关设施。

特殊巡视　在有外力破坏可能、恶劣气象条件（如大风、暴雨、覆冰、高温等）、重要保电任务、设备带缺陷运行或其他特殊情况下由运行单位组织对设备进行的全部或部分巡视。特殊巡视的主要范围：①存在外力破坏可能或在恶劣气象条件下影响安全运行的线路及设备。②设备缺陷近期有发展和有重大（严重）缺陷、异常情况的线路及设备。③重要保电任务期间的线路及设备。④新投运、大修预试后、改造和长期停用后重新投入运行的线路及设备。⑤根据检修或试验情况，存在薄弱环节或可能造成缺陷的线路及设备。

夜间巡视　在负荷高峰或雾天的夜间由运行单位组织进行，主要检查连接点有无过热、打火现象，绝缘子表面有无闪络等的巡视。

故障巡视　由运行单位组织进行，以查明线路发生故障的地点和原因为目的的巡视。

监察巡视　由管理人员组织进行，以了解线路及设备状况，检查、指导巡视人员工作的巡视。

巡视周期　①定期巡视周期见表1。根据设备定级级别（见配电网设备状态评估），可对该设备的定期巡视周期作动态调整。一级、二级设备可适当简化巡视内容，延长定期巡视周期；三级设备应进行全面仔细的巡视检查，并缩短巡视周期，确保对设备运行状态的可控、在控；四级设备应进行有效监控；架空配电线路通道与配电电缆线路通道的定期巡视周期不得延长。②重要负荷和三级污秽及以上地区线路每年至少进行一次夜间巡视，其余视情况确定（线路污秽分级标准按当地电网污区图确定，污区图无明确认定的，参考表2进行分级）。③重要线路和故障多发线路每年至少进行一次监察巡视。

表1　定期巡视周期

序号	巡视对象	周　期
1	架空配电线路通道	市区：1个月
		郊区及农村：1个季度
2	配电电缆线路通道	1个月
3	架空配电线路及其附属电气设备、柱上开关设备、柱上配电变压器、柱上电容器等	市区：1个月
		郊区及农村：1个季度
4	电缆、电缆分支箱（见配电电缆分支箱）	1个季度
5	户外电缆终端	1个月
6	开闭所、环网单元	1个季度
7	配电所、箱式变电站	1个季度
8	防雷与接地装置	与主设备相同
9	自动化设备、直流电源	与主设备相同

表2　架空配电线路污秽分级标准

污秽等级	污秽条件		线路爬电比距（cm/kV）	
	污湿条件	盐密（mg/cm²）	中性点非直接接地	中性点直接接地
a	大气清洁地区及离海岸盐场50km以上无明显污染地区	≤0.03	1.9	1.6
b	大气轻度污染地区，工业区和人口低密集区，离海岸盐场10～50km地区。在污闪季节中干燥少雾（含毛毛雨）但雨量较多时	0.03～0.06	1.9～2.4	1.6～2.0

续表

污秽等级	污秽条件		线路爬电比距(cm/kV)	
	污湿条件	盐密(mg/cm^2)	中性点非直接接地	中性点直接接地
c	大气中等污染地区，轻盐碱和炉烟污秽地区，离海岸盐场3～10km地区。在污闪季节中潮湿多雾（含毛毛雨）但雨量较少时	0.06～0.10	2.4～3.0	2.0～2.5
d	大气污染严重地区，重雾和重盐碱地区，近海岸盐场1～3km地区，工业与人口密度较大地区，离化学污源和炉烟污秽300～1500m的较严重地区	0.10～0.25	3.0～3.8	2.5～3.2
e	大气特别严重污染地区，近海岸盐场1km以内，离化学污源和炉烟污秽300m以内的地区	0.25～0.35	3.8～4.5	3.2～3.8

巡视范围 ①架空配电线路巡视，包括通道的巡视、杆塔和基础的巡视、横担/金具/绝缘子的巡视、拉线的巡视、导线的巡视、线路标志的巡视；②配电电缆线路巡视，包括通道的巡视、电缆管沟/隧道内部的巡视、电缆终端头的巡视、电缆中间接头的巡视、电缆线路本体的巡视、电缆分支箱的巡视、电缆温度的检测；③柱上开关设备巡视，包括柱上断路器的巡视、柱上负荷开关的巡视、柱上隔离开关的巡视、跌落式熔断器的巡视；④开关柜和环网柜巡视；⑤配电变压器巡视；⑥站所类建（构）筑物的巡视；⑦柱上电容器巡视；⑧防雷和接地装置巡视；⑨配电网自动化系统终端设备巡视；⑩直流电源设备巡视。

peidianwang shebei yunxing guanli

配电网设备运行管理

(operation management of distribution equipment) 保证配电网设备处于安全、可靠运行状态所采取的管理活动。加强设备的运行管理，可以减少维修成本，延长设备的使用寿命，延缓设备投资，同时积累相关的运行信息，为调度、检修计划的安排提供有效依据。包括台账管理、设备巡检、设备防护、缺陷管理、事故隐患管理、技术资料管理等内容。

台账管理 设备档案资料的管理。包括设备制造厂家、名称、编号、型号、规格、购买日期、投运日期、设备缺陷、检修记录等。在维护、技术改造后需要及时更新。配电网设备众多，变更频繁，台账管理繁杂，需要设专人进行管理，并应用计算机技术进行科学管理（见配电地理信息系统），以提高工作效率与管理水平。

设备巡检 为掌握配电网设备运行状况及其周围环境变化而进行的巡视检查（简称巡视）工作。分为定期巡视、特殊巡视、夜间巡视、故障巡视、监察巡视。通过巡视，及时发现配电网设备的缺陷、隐患或故障，并采取相应措施及早予以消除，预防事故的发生，确保设备安全运行，提高供电可靠性。（见配电网设备巡检）

设备防护 为保障配电网设备安全运行、维护公共安全而采取的防护措施。配电网设备多分布在人类活动频繁的区域，易受外界干扰、外力破坏，供电企业运行部门应根据国家电力设施保护相关法律法规，结合本单位实际情况，制定配电网设备防护措施，并定期对外力破坏防护工作进行总结分析。（见配电网设备防护）

缺陷管理 对设备存在的缺陷进行管理。运行单位依据规定对设备进行巡视，定期开展缺陷统计分析工作，及时掌握缺陷产生原因和消除情况，有针对性地采取相应措施，按轻、重、缓、急消除缺陷，提高设备健康水平，保证设备安全运行。设备带缺陷运行期间，应加强监视，必要时制定相应应急措施。

缺陷类别 根据不同的缺陷性质以及对设备安全运行造成威胁的程度，将设备缺陷分为一般、重大（严重）、紧急（危急）缺陷三类。①一般缺陷。设备本身及周围环境出现不正常情况，一般不威胁设备的安全运行，可列入小修计划进行处理的缺陷。②重大（严重）缺陷。设备处于异常状态，可能发展为事故，但设备仍可在一定时间内继续运行，须加强监视并进行大修处理的缺陷。③紧急（危急）缺陷。严重威胁设备的安全运行，不及时处理，随时有可能导致事故的发生，必须尽快消除或采取必要的安全技术措施进行处理的缺陷。

缺陷管理流程 按照“运行发现—上报管理部门—安排检修计划—检修消缺—运行验收”的流程形成闭环管理。缺陷管理资料应归档保存；缺陷管理实行网上流转的，也应按闭环管理流程在网上进行流转管理，每月应对缺陷的消除情况进行打印存档。紧急（危急）缺陷消除时间不得超过24h；重大（严重）缺陷应在7天内消除；一般缺陷可结合检修计划尽早消除，但应处于可控状态。

事故隐患管理 对作业场所、设备及设施的不安全状态以及人的不安全行为和管理上的缺陷等可能造成事故的因素进行管理。事故隐患管理纳入日常运行工作中，按照“（排查）发现—评估—报告—治理（控制）—验收—销号”的流程形成闭环管理。根据可能造成的事故后果，分为一般事故隐患和重大事故隐患两级。

一般事故隐患 可能造成人身重伤事故、一般电网和设备事故的隐患。

重大事故隐患 可能造成人身死亡事故，重大及以上电网、设备事故，由于供电原因可能导致重要电力用户严重生产事故的隐患。

技术资料管理 对各种设计图纸、设备资料、运行图（表）、运行记录等进行管理，是配电网设备运行管理的基础。供电企业各运行单位应用各类信息化手段，统一各类资料的格式与管理流程，实现规范化管理，确保资料的及时性、准确性、完整性、唯一性。除档案管理资料有特别要求外，各类资料的保存方式向无纸化方向发展。

（1）通用技术资料。包括系统图及单线图、杆位图及电缆路径图、线路与设备参数等台账记录、竣工（中间）验收记录和设备技术资料、设计资料图纸与变更设计的证明文件以及竣工图、设备出厂/交接/预试记录、接地电阻测量记录、测温记录、巡视手册及巡视记录、试验与检修记录、缺陷及处理记录、故障及处理记录、运行分析记录、线路与设

备更改（异动）记录及通知单、防护及整改通知书、维护（产权）分界点记录、多电源用户记录、用户委托运行协议书等。

（2）架空配电线路技术资料。除通用技术资料外，还包括线路交叉跨越记录、同杆架设线路不同电源记录。

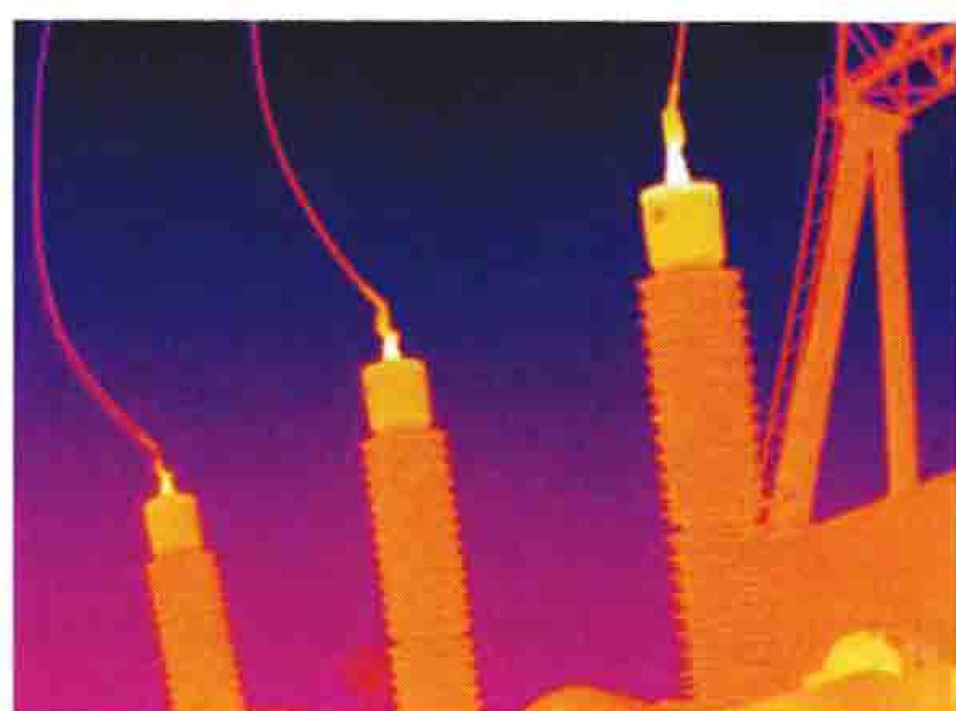
（3）配电电缆线路技术资料。除通用技术资料外，还包括电缆终端及中间接头制作记录、电缆管线图。

（4）开关、变压器类设备技术资料。除通用技术资料外，还包括主接线图、公用变压器负荷及电压测量记录、保护定值（熔断器配置）记录。

peidianwang shebei zaixian jiance jishu

配电网设备在线监测技术　（on-line monitoring technique of distribution equipment）　实时记录表征配电网设备运行状态特征量的测量和诊断技术。通过对能反映设备整体或其相关零部件性能工况的状态特征量进行检测鉴定，判断其运行状态有无异常与劣化征兆，或对异常情况进行追踪，预测其劣化趋势，确定其劣化程度，以便采取针对性控制措施，防止故障发生，从而减少故障停运时间与停运损失，提高设备利用率。配电网设备在线监测系统由传感器、数据采集装置、通信系统、专家分析系统及数据信息库组成。配电网设备在线监测技术还在不断地发展中，特别是状态特征量的确定、测量以及报警阈值确定等技术问题，还需要深入地研究探索、积累经验。较为成熟的在线监测技术有红外热像检测、紫外线成像检测、油中溶解气体检测、SF_6气体泄漏检测、局部放电检测等。

红外热像检测技术　当配电网设备本身具有不同于周围环境的温度时，热量在设备内部通过传导、辐射、对流等形式扩散和传递，因设备材料或热物理性质的不同，或受阻堆积，或通畅无阻，最终会在设备表面产生温差而形成相应的冷热区域。红外热像检测技术通过检测设备由里及表出现的温差，确定设备表面的冷热区域，结合设备内部结构进行分析或与典型图谱进行对比，可以迅速诊断出配电网设备是否存在缺陷。红外热像检测发现的缺陷主要有电流致热型缺陷和电压致热型缺陷。图示为变压器三相套管红外热像。


变压器三相套管红外热像

紫外线成像检测技术　高压设备局部放电时，根据电场强度的不同，会产生电晕、闪络或电弧。在放电过程中，空气中的电子不断获得或释放能量，而当电子释放能量（即放电）时便会放出紫外线。紫外线成像检测设备接收配电网设备放电时的紫外信号，经处理后与可见光影像重叠，显示在仪器的屏幕上，从而可以确定设备放电的位置和强度，及早发现配电网设备的潜在故障。

油中溶解气体检测技术　对配电网设备绝缘油中各类溶解气体和游离气体的浓度进行检测，用于判断设备内部状况，包括油气分离、气体分析、故障分析三个过程。①油气分离技术包括高分子聚合物分离方法、真空脱气法、置换脱气法、溶解平衡法四大类。②气体分析技术包括气相色谱法、电子鼻法、光谱分析法。③故障分析技术主要应用人工神经网络技术、模糊技术、专家系统技术进行故障分析。绝缘油在热和电的作用下，会逐渐老化和分解，产生少量的氢气、一氧化碳、二氧化碳和各种低分子烃类气体，如甲烷、乙烷、乙烯、乙炔等，这些气体大部分溶解在油中。发热和放电的严重程度不同，所产生的气体种类、油中溶解气体的浓度、各种气体的比例关系也不相同。当配电网设备存在潜伏性故障时，会加快这些气体的产生速度。故障产生的特征气体及其含量与故障的类型和故障严重程度密切相关。对油中溶解气体进行检测、分析，能够尽早发现设备内部存在的潜伏性故障并可随时掌握故障的发展趋势。

SF_6气体泄漏检测技术　主要包括电化学传感技术、气体放电技术、电子捕获技术、红外光谱技术。①电化学传感技术。利用SF_6与某些物质发生化学反应所产生的电信号来检测。②气体放电技术。根据SF_6分子的电位低于空气中其他气体的特性，从置于被检测空气中的高压电极间电压的变化进行检测。③电子捕获技术。利用SF_6分子可捕获自由运动电子的特性进行检测。④红外光谱技术。利用SF_6可吸收特定波段红外光的特性进行检测。

局部放电检测技术　局部放电是指电力设备绝缘介质的部分区域发生的尚未导致贯穿性击穿的放电，表明设备存在潜伏性故障，会影响设备绝缘寿命。发生局部放电时，会伴随产生电脉冲、超声波、电磁辐射、光、化学反应，并引起局部发热等现象。根据检测量的不同分为脉冲电流法、超高频检测法、超声波法、化学分析法、红外热像法、光检测法等。①脉冲电流法。脉冲电流经过“检测阻抗”会在其两端产生一脉冲电压，经采集、处理后可得到放电量、放电重复率等基本数据。脉冲电流法是研究最早、使用最广泛的一种检测局部放电的方法。②超高频检测法。局部放电时产生的电磁辐射频带在几兆赫至10MHz之间，通过检测电磁辐射判断设备的状态，用于电缆、干式变压器等固体绝缘设备的局部放电检测。③超声波法。通过超声传感器将声波信号转换为电信号，主要用于判断有无局部放电信号，一般不单独应用，而是作为其他检测方法的辅助手段。④化学分析法。用于分析设备绝缘油中各类溶解气体。⑤红外热像法。用于检测局部发热，局部放电未引起明显的局部过热时，该方法不灵敏。⑥光检测法。通过紫外线成像检测技术检测光辐射。

peidianwang shebei zhuangtai pinggu

配电网设备状态评估　（condition evaluation of distribution equipment）　根据配电网设备状态信息评价其健康状态的工作，又称配电网设备状态评价。这是设备状态检修（见配电网设备检修）的基础工作。采用各类信息化管理手段以及各种离线、在线检测技术，开展设备状态评估，掌握设备发生故障之前的异常征兆与劣化信息，事前采取针对性控制措施，防止故障发生，减少故障停运时间与停运损失，提高设备利用率，并进一步指导、优化配电网运行、检修工作。

设备状态信息　包括设备投运前信息、运行中信息以及

家族缺陷信息。①投运前信息。包括型式试验报告、出厂试验报告、性能指标等出厂资料以及交接验收资料。②运行中信息。包括运行环境和污秽区（见配电网设备巡检）划分资料、巡视记录、修试记录、故障（异常）记录、缺陷记录、状态检测记录、越限运行记录等。③家族缺陷信息。由设计、材质、工艺等共性因素导致的设备缺陷信息，可通过对比同类型设备获取。

供电企业运行单位制订定期收集配电网运行信息的计划与方法，坚持准确性、全面性与时效性的原则，各相关专业部门根据运行单位需要及时提供信息资料；对于收集的信息，运行单位进行初步的分类、分析判断与处理，为开展状态评估提供依据。

评估范围 按不同设备划分相应部件范围：①架空配电线路。杆塔（基础）、导线、绝缘子、铁件金具、拉线、通道、接地装置及附件等。②配电电缆线路。电缆本体、电缆终端、电缆中间接头、接地系统、电缆通道及辅助设施等。③柱上开关（真空断路器、SF_6 断路器）。套管、开关本体、隔离开关、操动机构及接地系统等。④柱上隔离开关。支持绝缘子、开关本体、操动机构、接地系统等。⑤柱上跌落式熔断器。支持绝缘子、熔丝具本体、引线等。⑥柱上金属氧化物避雷器。本体、引线、接地系统等。⑦柱上电容器。套管、电容器本体、熔丝具、控制机构及接地系统等。⑧配电变压器（见图）。绕组及套管、分接开关、冷却系统、油箱、非电量保护、接地系统、构筑物及绝缘油等。⑨开关柜。本体、操动机构及控制回路、辅助部件等。



DZN-12 型户内真空断路器

评估内容 按不同设备的不同部件确定相应的评估内容：①架空配电线路。绝缘性能、温度、机械特性、外观、负荷情况、接地电阻、电气距离等。②配电电缆线路。电气性能、机械性能、防火阻燃、设备环境和外观等。③柱上开关（真空断路器、SF_6 断路器）。绝缘性能、直流电阻、温度、机械特性和外观等。④柱上隔离开关。绝缘性能、温度、机械特性和外观等。⑤柱上跌落式熔断器。绝缘性能、温度、机械特性和外观等。⑥柱上金属氧化物避雷器。绝缘性能、外观和接地电阻等。⑦柱上电容器。绝缘性能、温度、机械特性和外观等。⑧配电变压器。绝缘性能、直流电阻、温度、油性能、机械特性和外观（油位、呼吸器、硅胶、密封）等。⑨开关柜。绝缘性能、开断能力、载流能力、SF_6 气体、机械特性、压力和外观等。

评估方法 以量化的方式进行评估。按不同设备不同部件的评估内容所包含的状态量及其权重计算整体得分。状态量指直接或间接表征设备状态的各类信息，如数据、声音、图像、现象等。可根据不同的气候与地域特点，合理确定该地区的设备评估扣分值、各部件权重等评估指标。①架空配电线路以线段按主线（小分支可归并到上一级线路）和分支线为基本单元开展评估。②配电电缆线路以段为基本单元开展评估。③柱上设备、配电变压器、开关柜等以台为基本单元开展评估。

评估结果 分为正常状态、注意状态、异常状态、严重异常状态。评估结果为注意、异常、严重异常的设备应缩短巡视周期并及时进行跟踪评估。

正常状态　设备运行数据稳定，所有状态量符合标准。

注意状态　设备的几个状态量不符合标准，但不影响设备运行。

异常状态　设备的几个状态量明显异常，已影响设备的性能指标或可能发展成严重异常状态，但设备仍能继续运行。

严重异常状态　设备状态量严重超出标准或严重异常，设备只能短期运行或立即停役。

评估周期 特别重要设备每年一次，重要设备 1～2 年一次，一般设备 1～3 年一次。采用动态评估和定期评估相结合的方式，每次获得设备状态量后，均应根据状态量对设备进行评估。

设备定级 根据评估结果将设备级别分为四级。属于一、二级设备的为完好设备。

一级设备　设备运行状态良好，评估结果为正常状态。

二级设备　设备个别次要元部件存在缺陷，不影响安全运行，评估结果为注意状态。

三级设备　设备重要元部件存在缺陷，尚不影响安全运行，评估结果为异常状态。

四级设备　设备存在重大缺陷，仍可短期继续安全运行，评估结果为严重异常状态。

peidianwang shuju caiji yu jiankong xitong

配电网数据采集与监控系统 (supervisory control and data acquisition of distribution networks)　采集配电网设备运行数据，建立历史数据，实现配电网安全经济运行、控制、事故处理和分析计算的计算机应用系统，简称 DSCADA 系统。它是配电网自动化系统的一个子系统，服务于配电网的运行调度与生产指挥，为配电网自动化高级应用提供基础的支撑平台，并为配电管理系统提供配电网实时运行数据。

功能 主要包括数据采集与处理、运行监视与事件处理、控制与调节、历史数据记录与统计、事故数据记录等。

数据采集与处理　采集配电网实时/准实时运行数据。对于不具备通信条件或未安装配电网自动化系统终端的站点数据，由操作员通过电话询问或按计划输入。系统采集的运行数据包括状态量、量测量与电度量。

状态量又称遥信量。包括断路器、自动重合器、负荷开关、隔离开关等开关设备的位置状态，配电网继电保护、故障指示器和报警装置等的动作状态。具有合、分或有、无两种状态，分别用二进制“1”或“0”表示。

量测量又称遥测量。第一类是由配电网自动化系统终端直接将模拟量进行 A/D 转换得到的测量数据，如电压、电流、温度等；第二类是由配电网自动化系统终端通过测量数据计算得到的数据，如有功功率、无功功率、功率因数、频率、谐波等；第三类是数字量，如各种整定值。

电度量通过直接读取智能电能表或计数电能表脉冲输出获得。

运行监视与事件处理 运行人员通过人机界面监视采集的配电网数据，对状态量变化、量测量越限事件进行处理。事项信息可长期保存并可随时按指定条件查询、打印。

(1) 运行监视。正常运行情况下，在调度员工作站计算机画面上显示配电网接线图、电网实时数据以及断路器、隔离开关、负荷开关分合状态等，并具有动态着色功能。常规的DSCADA系统界面显示配电网单线图；在能够获取配电网地理图形信息时，DSCADA系统界面显示以地理图形为背景的配电网接线图，便于进行工况监视与故障处理。

(2) 事件处理。①在状态量有变化（如开关变位）时产生状态量变化事件，记录其时间，与设备正常运行状态相比较，得到一个正常或非正常的设备运行状态。②在设备出现异常运行状态时，产生事故报警信息，自动推出一个窗口画面报警，并辅以足够的声光报警，报警信息长期保留，可随时查询。③连续监视量测量变化，并与预先设定的限值相比较，在量测量越限（如过电流）时，产生越限事件，并进行报警。

控制与调节 运行人员通过调度工作站的人机界面，向配电网自动化系统终端下发命令，如遥控开关的分合、电容器（电抗器）组的投切，调节配电变压器分接头，下发校时命令、整定参数表等。遥控可以是单点执行方式，也可以按照预先设定的程序成批执行。

历史数据记录与统计 记录量测量、电度量数据；记录量测量越限、状态量变位事件；实现事件顺序记录以及遥控、遥调等操作的记录；统计电压合格率、配电网负荷率等数据。

事故数据记录 收集、记录配电网事故数据，供运行人员对事故进行分析、处理，为预防事故提供资料。包括顺序时间记录（SOE）与事故追忆（PDR）两部分。①顺序时间记录是在状态量出现变化时，按时间顺序准确地记录下来，时间分辨率达到毫秒级。事后运行人员在计算机界面上以列表等形式按时间顺序显示事件发生过程。②事故追忆用于记录事故前后量测数据和状态数据，供事后再现事故过程，以方便事故的研究与分析。典型的记录时间长度是事故前10min、事故后5min，事故追忆区要能保存多次事故记录。

构成 DSCADA系统由主站、子站、终端及信息传输通道4部分组成，与配电网自动化系统共享软硬件资源。（见配电网自动化系统）

特点 包括：①监控对象为中低压配电网中的变电站中压出线断路器、自动重合器、柱上开关、环网柜、开闭所、配电室、配电变压器、无功补偿电容器等，因配电网接线复杂，监控节点众多、分布面广，系统需要处理海量数据，一个大型配电网的监控站点达上万个，处理的信息量有50多万个。②主要关注配电网异常运行状态与故障的处理，对模拟量测量精度要求相对较低，对数据刷新周期的要求也不高。为减轻数据处理的压力，配电网自动化系统终端一般采用“主动报告”机制，在检测到开关变位、故障等事件时即时上报，而正常量测数据的刷新周期则可选为数分钟甚至数十分钟。③配电网异动率很高，结构经常因增容、技术改造、城市建设等原因变化，需要及时地更新系统网络拓扑结构，参数配置、系统维护工作量大。④需要与能量管理系统、配电地理信息系统、配电生产管理系统、停电管理系统等自动化系统频繁交换数据，系统设计的开放性要求高。

展望 根据未来配电网的应用要求，DSCADA系统采集的数据将更为全面、完整，除常规遥测、遥信与故障检测信息外，还包括设备运行状态监测，如配电设备的温度、局部放电等数据，能够实现全局的“可视化”管理。随着分布式电源的大量接入，配电网成为一个功率双向流动的有源网络，必须使用快速实时仿真、辅助决策等高级应用软件，以对其进行有效的控制与管理。为保证高级应用软件的运行效果，要求DSCADA系统能够实现高精度同步数据采集，并提供电压、电流相量信息。此外，系统需具有良好的开放性与可扩展性，采用符合IEC 61850标准的信息交换模型与通信规约，支持配电网自动化系统终端与应用软件的即插即用。

peidianwang wugong buchang

配电网无功补偿 (reactive power compensation of distribution networks) 调节配电网无功功率供需平衡的措施。配电网无功补偿可以改善配电网的无功分布，提高功率因数，改善电压质量，降低线损，减少或消除配电网的电压波动或畸变，支撑枢纽点的电压，增大配电网的供电能力。有串联补偿和并联补偿两种方式，配电网一般采用并联补偿方式。

分类 配电网无功补偿必须坚持分级补偿、就地平衡的原则，一般可分为集中补偿、分散补偿、就地补偿等3种形式。

集中补偿 将补偿装置集中安装在变电站母线上。补偿变电站主变压器和上一级电网的无功损耗，使变电站范围内无功功率基本平衡，提高变电站电压质量。补偿装置除传统的开关投切并联电容器外，随着电力电子、电能控制等技术的综合应用，晶闸管投切的静止型动态无功补偿装置（SVC）也逐步得到应用。集中补偿方式具有安装维护方便、利用率较高等优点，缺点是对中压配电网的降损不起作用。

分散补偿 将电容器组分组安装在线路杆塔上或工厂车间变电所，与线路或工厂部分负荷同时投切。线路补偿主要提供线路和配电变压器需要的无功功率，适用于功率因数低、负荷大的长线路。在农村架空线路上常采用这种方式，还可降损和改善电网电压。线路补偿点不宜过多，控制方式应从简，一般不采用分组投切控制。这种补偿方式具有投资小、补偿效果较好等优点；缺点是存在适应能力差、重载情况下补偿不足等问题。工厂车间补偿则提供本车间用电设备所需无功补偿。

就地补偿 将电容器直接接在单台用电设备的同一电气回路，与用电设备同时投切。这种方式最普遍的应用是电动机无功补偿，将电容器组与电动机并接，通过控制、保护装置与电动机同时投切，使其无功就地平衡，既能减少配电线路的损耗，又能提高电动机的出力。或者是将电容器通过低压熔断器接在配电变压器二次侧，以补偿配电变压器空载或轻载时的无功损耗，使无功就地平衡，此方法在农网应用较普遍。就地补偿具有配置灵活方便、补偿效果好等优点；缺点是对非连续运行设备，电容器利用率低。

补偿容量确定 对于就地补偿和分散补偿而言，并联无

功补偿安装的最大容性无功量应等于装置所在地设备的负荷按提高功率因数所需补偿的最大容性无功量。按功率因数调整电费办法管理的用户，可按用电量大小确定功率因数要求值，并确定并联无功补偿装置的安装规模。集中安装在变电站母线上集中补偿装置的补偿容量，一般可按主变压器容量的10%～30%考虑。地区无功缺额较多或离电源点较远的变电站可取较高值，反之可取低值。

peidianwang wugong gonglü yu dianya kongzhi

配电网无功功率与电压控制 (reactive power and voltage control of distribution networks) 通过投切无功补偿装置调整运行方式，保持配电网整体或部分电压水平和无功功率平衡的一种技术措施。其目的是实现配电网无功功率平衡，尽量避免从输电网吸收无功功率或减少吸收的无功功率数量，降低电能传输损耗，提高电压质量。

控制方式 分为集中控制和就地控制两种方式。

集中控制 在配电网自动化系统主站端安装自动电压控制（automatic voltage control，AVC）软件，采集整个配电网的无功功率和电压数据，按照一定的逻辑控制要求向相关变电站发出指令，调节变压器有载调压分接头的位置和控制无功补偿装置。集中控制方式的优点是能够综合配电网无功功率和电压数据，合理调整系统无功功率和电压水平，缺点是响应速度慢且需要通信通道。集中控制方式能够对配电网的无功分布进行全局优化控制，以保证供电电压合格、线损最小。实际工程中，由于配电网结构复杂，并且不可能收集到完整的在线与离线数据，难以做到真正意义上的全局优化。

就地控制 分为变电站电压无功就地控制与线路电压无功就地控制两类。①变电站电压无功就地控制方式。在变电站中安装电压无功控制（voltage quality control，VQC）装置或变电站综合自动化后台VQC软件，就地实时采集无功功率和电压数据，按照一定的逻辑控制要求发出指令，调节变压器有载调压分接头的位置和控制无功补偿装置，达到无功优化、提高电网电压和降低线损的目的。②线路电压无功就地控制方式。在配电所或用户设备处安装无功电压综合控制设备，就地实时采集无功和电压数据，按照一定的逻辑控制要求，按需投入无功补偿容量，保持电压水平和无功功率平衡。就地控制方式的优点是响应速度快且无需通信通道，缺点是仅能改善局部地区的无功和电压水平。实际工程中，更多的是以某区域或某控制点的电压及功率因数为控制参数，实现就地控制。

电压无功控制方法包括功率因数跟踪法、无功需求量跟踪法、电压无功综合控制法。①功率因数跟踪法。根据补偿点的功率因数设定值与测量值自动计算无功补偿量，使补偿点处的功率因数达到预期设定值。②无功需求量跟踪法。根据补偿点的无功实际需求量确定补偿量，实现无功就地平衡。③电压无功综合控制法。以功率因数-电压九区图为根据，利用调压器调整补偿点处的电压与利用无功补偿装置实现无功就地平衡相结合的方法。

控制装置 分为调压变压器和无功功率补偿装置两类。

调压变压器 有无载调压和有载调压两种类型。①无载调压变压器需要在停电的状态下，改变变压器高压侧绕组分接头的位置，提高或降低电压。无载调压变压器的调压范围不大，一般为±5%，不能满足线路较长且负荷变化很大的情况。由于调压时必须停电，所以不能经常进行。②有载调压变压器是在变压器不中断运行的带电状态下，调节变压器高压侧绕组分接头的位置。有载调压变压器的调压范围相对无载调压变压器范围大，并且可以随时调整，容易满足电压偏差的要求，在配电网中广泛应用。利用调压变压器调压并未增加电源无功功率，只是改变了电源无功功率的分布。在总的电源无功功率不足的情况下，使得局部电压升高、无功功率增大，导致其他区域无功功率更小、电压更低。

无功功率补偿装置 包括并联电容器、静止无功补偿装置（SVC）、静止同步补偿器（D-STATCOM）。

并联电容器并联连接在配电网中，用来补偿感性无功功率以改善功率因数。由于通过电容器的交变电流在相位上超前于电容器上的电压，可视为发出无功功率。所发出的无功功率与所在连接点的电压的二次方成正比，即

$$Q=\frac{U^2}{X_C}$$

式中 Q 为无功功率；U 为电压；X_C 为电容器容抗。

并联电容器具有本身功耗小、装设灵活、维护方便、节省投资的优点，因此获得了广泛使用。不足之处是电容器的无功功率调节能力较差。当所在连接点电压下降时，它供给系统的无功功率也将减小。当系统发生故障或由于其他原因而导致系统电压下降时，电容器的无功功率输出反而比平常还少，将导致电压继续下降。为了在运行中能够调节电容器供给的无功功率，可根据需要按三角形接法或星形接法成组地并联连接到变电站母线上，根据负荷变化分组投入或切除，其容量可大可小，既可集中使用，又可分散使用。

展望 未来配电网中将有大量的分布式电源接入，将改变线路上电压的变化规律，在分布式电源渗透率较高，特别是因配电线路上负荷水平较低而向系统倒送功率时，会出现配电线路上电压大于母线电压的情况，从而导致配电线路电压超标。由于电网调度人员难以掌握分布式电源的投入、退出时间以及其发出的有功功率与无功功率的变化，使配电线路的电压调整控制变得更加困难。采用主动控制技术，允许分布式电源参与无功功率的调整，并应用现代网络通信与计算机技术，对配电网、分布式电源以及负荷进行更为积极、主动的协调控制，实现配电网的优化运行，提高电压合格率，降低损耗。

peidianwang yunxing guanli

配电网运行管理 (operation management of distribution networks) 使配电网及其设备处于安全、可靠、优质、经济运行状态所进行的管理活动。配电网运行管理是供电企业管理的核心内容。供电企业通过应用先进的技术与管理手段，优化配电网及其设备的运行方式，保证对用户的供电质量，以及降低损耗、提高设备利用率、节约运营成本。

基本任务 包括：①保证配电设备健康水平，延长设备服务寿命，充分发挥运行设备的配电能力，最大限度地满足负荷需求。②降低配电网故障率，在配电网出现故障时迅速隔离故障，尽快修复，恢复供电，保证配电网安全、可靠运行，提高供电可靠性。③合理配置无功补偿与电能质量控制设备，对电能质量进行监测与统计，对配电网进行有效的调

度，保证用户的电能质量。④使配电网运行在最经济的方式下，降低供电的电能损耗；延长配电设备运行寿命，延缓设备更新投资，降低供电成本。

主要内容 包括调度运行管理、设备运行管理、供电可靠性管理、电能质量管理、电能损耗管理。

调度运行管理 对配电网运行、操作和事故处理进行组织、指挥、指导和协调的管理活动。供电企业有专门的配电网调度机构（配电网调度所）负责调度运行管理。调度机构既是生产运行单位，又是职能管理机构，在配电网运行中行使调度指挥权。（见配电网调度运行管理）

设备运行管理 保证配电网设备处于安全、可靠运行状态所采取的管理活动。对配电网设备进行监视、检查和维护，确保配电网设备安全、可靠运行，及时处理设备故障，尽快恢复正常运行。包括台账管理、设备巡检、设备防护、缺陷管理、事故隐患管理、技术资料管理等内容。（见配电网设备运行管理）

供电可靠性管理 供电企业为提高供电系统对用户持续供电的能力而开展的管理活动。对配电网的安全、持续、不间断供电的能力进行统计和分析，发现影响供电可靠性的原因及规律，从而采取相应的技术与管理措施提高供电可靠性。

电能质量管理 通过监测、控制与治理以及监督管理工作将电压偏差、谐波、电压暂降等电能质量指标控制在允许的范围内。监测方式主要有定期监测、专项监测、在线监测。电压偏差控制措施主要包括无功功率补偿控制和变压器分接头调整（见配电网无功功率与电压控制）。谐波治理措施主要包括预防性措施和补偿措施，预防性措施是在电气设备（如发电机、变压器）和用电设备（如整流器）的设计、制造、配置等方面采取措施，补偿措施主要是采用无源交流滤波器和有源电力滤波器。电压暂降控制措施主要是在配电网与用户设备之间加装动态电压恢复器、静止同步补偿器等柔性配电设备，缓解电压暂降。监督管理工作是一项综合性很强的系统工程，涉及电力系统全过程的每一个环节，除了加强电能质量培训工作外，还要积极开发和推广提高电能质量的新技术和新产品，并切实加强执行供用电合同有关电能质量要求的严肃性。

电能损耗管理 为降低配电网产生的电能损失而开展的管理活动。供电企业采用技术和管理措施将配电网电能损耗降低到尽量小的合理范围内，提高配电网运行的经济效益。线损电量占供电量的百分数称为线路损失率，简称线损率。线损率是电网经营企业一个综合性的核心经济技术指标，加强线损管理是电网经营企业一项长期的战略任务和系统工程。（见配电网电能损耗管理）

peidianwang zidong chonghezha

配电网自动重合闸

(auto-reclosing of distribution networks) 配电网断路器因线路故障等原因跳闸后经预定时间再次合闸的自动化措施。架空配电线路发生短路故障时，保护装置动作使断路器跳闸，经短时间间隔后使断路器重新合闸。如果故障消失，则重合成功；如果故障未消失，保护装置动作使断路器再次跳闸。架空配电线路的绝大部分故障是由于雷电过电压造成的绝缘瞬间闪络、大风引起的碰线以及鸟害等原因引起的瞬时性故障，采用自动重合闸，可以使出现瞬时性故障的架空配电线路恢复正常运行，提高供电可靠性。据统计，60%～90%的架空配电线路故障能够重合成功。在小电流接地系统中，采用自动重合闸，能够有效减少因拉路选择故障线路造成的非故障线路的停电时间。此外，自动重合闸还能够纠正断路器本身由于操动机构不良或继电保护误动作而引起的误跳闸。对于配电电缆线路，因故障多为永久性的，一般不实施自动重合闸。

工作方式 按照与继电保护的配合方式，分为重合闸前加速保护方式和重合闸后加速保护方式两种。

重合闸前加速保护方式 当线路发生故障时，第一次由继电保护瞬时动作切除故障，然后进行重合。如果重合于永久故障上，则在断路器合闸后，继电保护有选择性地带时限动作切除故障。一般用于具有几段串联的辐射式线路中，重合闸装置仅靠近电源侧安装。其优点是能够快速切除瞬时性故障，使瞬时性故障来不及发展成永久性故障，从而提高重合闸的成功率。只需在线路最上游的断路器处配置重合闸，简单、经济。不足之处是第一次动作无选择性，造成停电范围扩大；对于永久性故障切除时间较长，并且使装设重合闸的断路器动作次数较多。

重合闸后加速保护方式 当线路发生故障时，第一次由继电保护有选择性地动作切除故障，然后进行重合。如果重合于永久性故障上，则在断路器合闸后，再加速继电保护动作，瞬时切除故障。一般用于有重要负荷的供电线路上，需要在线路上配置多套重合闸。其优点是第一次有选择性地切除故障，不会扩大停电范围；能够保证永久性故障瞬时切除，并仍然是有选择性的。不足之处是因延时切除故障会造成较长时间的电压暂降；每个断路器都需要配置重合闸，与重合闸前加速保护相比较为复杂。

重合闸时间 由故障点断开电源到再接通系统电压的间隔时间。它包括由断路器跳闸到给出断路器合闸命令的预定时延与断路器固有合闸时间。重合闸时间必须大于故障点消弧及绝缘恢复的时间，才能保证重合闸成功。配电网重合闸时间一般整定在0.7～1s。

重合闸次数 针对一次故障，重合闸动作的次数。中国架空配电线路主要采用三相一次重合闸。在采用就地控制方式的馈线自动化中，为了与线路上的自动分段开关配合，变电站10kV出线断路器一般采用三相二次重合闸。为提高重合成功率，有些国家，如美国，采用三相三次或四次重合闸方式。采用多次重合闸能够有效提高重合成功率。据美国一雷电高发区电力公司的统计结果，一次重合闸的成功率为83.25%，而第二次与第三次重合闸的累计成功率则分别为93.3%与94.72%。

peidianwang zidonghua gaoji yingyong

配电网自动化高级应用

(advanced applications of distribution network automation) 在配电网数据采集与监控系统平台上运行的，完成配电自动故障处理与优化运行功能的应用软件。利用配电网的实时信息和网络基础信息，进行配电网运行状态分析，为配电网安全与优化运行提供决策支持。实际工程中，为了提高可靠性及便于管理，通常在配电网自动化系统主站上增加专用的工作站，运行高级

应用软件，完成高级应用。

基本内容 包括馈线自动化、网络拓扑分析、状态估计、潮流计算、短路计算、合环分析、负荷预测、网络重构。

馈线自动化 中压配电线路故障定位、隔离与恢复供电的自动化措施。（见馈线自动化）

网络拓扑分析 依据开关的分合状态和网络元件状态将有电气联系的配电线路集合化为电气岛，实现配电网络接线分析。网络拓扑分析是配电网其他高级应用在电网连接方面的分析基础。

状态估计 实现配电网不良量测数据的辨识以及各类量测的估计。状态估计可以实现配电网缺失信息的修补，为配电网其他高级应用提供基础数据。

潮流计算 根据配电网络模型、参数及输入输出功率，计算配电网稳态运行条件下的潮流分布。潮流计算是实现配电网运行方式变化分析的基础。

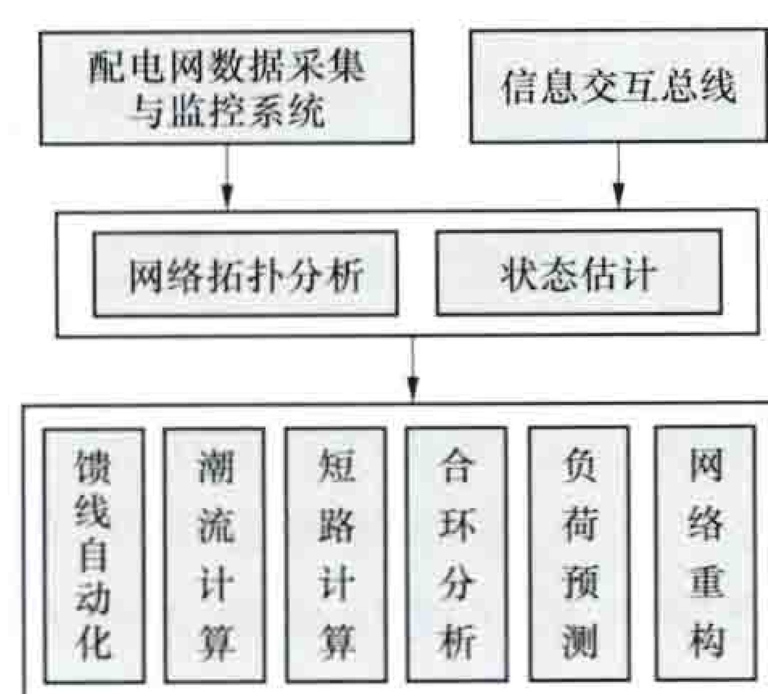
短路计算 设定不同类型的各种假想事故，计算配电网短路电流及各节点电压。短路计算可用于配电网继电保护整定及配电设备的选型。

合环分析 针对合环操作进行合环路径自动搜索并计算合环稳态电流值、环路等值阻抗以及合环最大冲击电流值，实现合环前后潮流比较。合环分析可以为调度员在合环操作前进行模拟，减少合环对配电网的冲击。

负荷预测 综合考虑配电网历史负荷、气象、用户类型以及日期类型等多种信息，预测配电网区域的未来负荷变化趋势。负荷预测分为超短期、短期和中长期负荷预测。

网络重构 在满足配电网安全约束的前提下，通过开关操作等方式改变配电线路的运行方式。网络重构能够消除线路过载和电压偏差越限，均衡负荷，降低网损，提高设备容量利用率。

工作原理 各高级应用的软件程序设计一般采用模块化设计，利于高级应用软件的扩充，便于程序的集成和调试。其中网络拓扑分析和状态估计是基础应用软件模块，为馈线自动化、潮流计算、短路计算、合环分析、负荷预测、网络重构等其他高级应用提供电网拓扑连接与数据处理结果，如图所示。其工作方式有实时态、研究态以及未来态3种类型。实时态是基于当前实时信息完成高级应用计算，研究态是取某一个历史时间断面或者当前实时信息的一个镜像断面完成高级应用计算，未来态则是针对未来预测信息完成高级应用计算。配电网自动化高级应用软件分嵌入软件方式和独立软件方式两种。



配电网自动化高级应用软件结构示意图

嵌入软件方式 以软件系统形式嵌入配电网自动化系统主站中实现高级应用。其计算的输入信息来源于配电网数据采集与监控系统的实时数据库、历史数据库以及相关电网基础参数库。

独立软件方式 以独立软件系统通过信息交互总线与其他相关应用系统互连实现高级应用。其计算的输入信息来源于信息交互总线与其他相关应用系统，包括实时信息、历史信息以及相关电网基础参数信息。

peidianwang zidonghua tongxin xitong

配电网自动化通信系统

（communication system for distribution networks automation） 完成配电网自动化系统中各类业务信息传输的通信系统。配电网自动化系统具有节点多、分散、节点通信数据量少等特点，其通信系统通常采用主干通道与分支通信网相结合的网络结构，使用的规约主要有IEC 60870-5-101、IEC 60870-5-104、DNP3.0等，常用的通信技术有光纤通信、无线通信、配电线载波等。

网络结构 由主干通道、分支通信网、通信网关或配电网自动化系统子站、终端等构成，如图1所示。

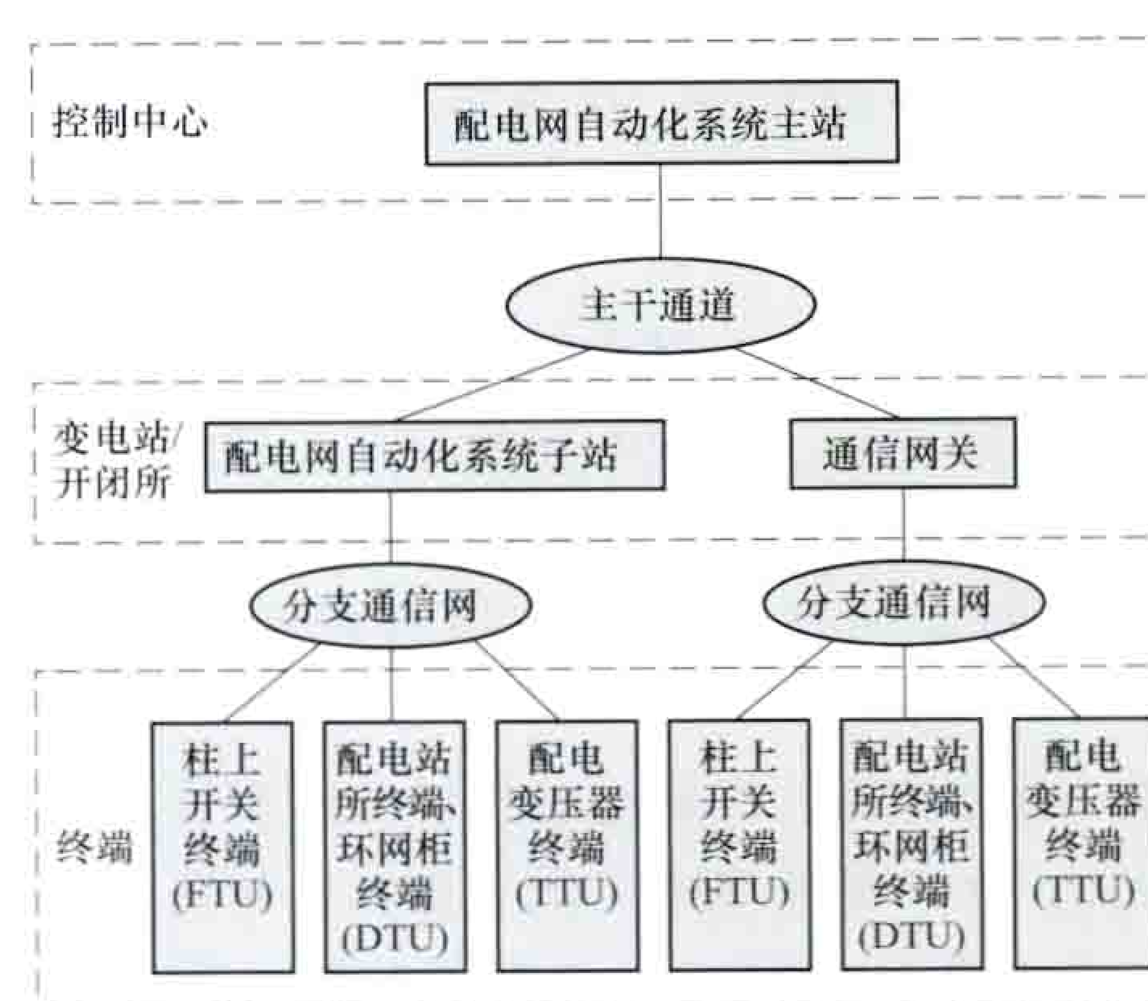


图1 配电网自动化通信系统结构

主干通道 配电网自动化系统主站与变电站或开闭所之间的数据传输通道。主干通道数据传输量比较大，支持的通信速率在64kbit/s～2Mbit/s之间。

分支通信网 变电站或开闭所与附近小区内配电网自动化系统终端之间的数据传输网。分支通信网站点多而分散，每一个站点数据传输量小，通信距离比较短（在一个变电站供电半径内）。

通信网关 主干通道与分支通信网之间的连接点。一般安装在变电站或选定的开闭所或配电所内，实现附近小区内配电网自动化系统终端与主站之间数据的汇集、转发。

配电网自动化系统子站 安装在变电站或开闭所内，收集处理并转发一个供电小区内配电网自动化系统终端数据，除具有通信网关的功能外，还能够完成小区内配电网运行管控与馈线自动化功能。（见配电网自动化系统子站）

光纤通信 利用光纤作为通信通道的通信方式。具有传输速率高、抗干扰性能强、可靠性高的优点，是配电网自动化通信系统的首选通信通道。有光纤专线通道和光纤以太网两种方式。

光纤专线通道 串行数据传输光纤通信通道，有主从、环路通信对等、双环自愈等配置方式。光纤专线通道结构简单、易于实现，传输延时小并且可控，但不支持配电网自动化系统终端主动上报通信机制，更不能实现终端之间的点对点对等数据交换，在中国已逐渐被光纤以太网取代。

光纤以太网 利用光纤通信的以太网，包括工业光纤以太网和以太网无源光网络两种形式。采用光纤以太网通信，可以充分利用光纤带宽，提高数据传输速率与容量；能够更好地适应配电网自动化系统的应用特点，支持终端主动上报通信机制。此外，接到以太网上的配电网自动化终端之间能

够对等交换数据，支持快速故障自愈控制等分布式智能控制应用。（见馈线自动化）

工业光纤以太网是面向工业现场应用的光纤以太网，技术上与以太网兼容。其技术特点包括：①交换机通过快速生成树冗余、环网冗余、主干冗余等技术可以实现光纤环网及多环耦合功能，其中环网冗余技术可以在300ms内完成自愈。②交换机采用工业级元器件，功耗较小（双光口配置的设备功率约为6W），可以在高温、强电磁辐射的环境下使用，适用能力较强。③网管系统可在线监测网络运行状态。④各设备厂家的设备之间无法实现在环网冗余等层面的互联。如果要实现不同厂家设备之间的互联，网络只能支持到快速生成树冗余，自愈能力将从300ms增加到1～2min。⑤一个两层网络，网内节点需限制在200个左右，才能很好地控制网络风暴。⑥对配电网一次网架结构变化的适应能力较差。工业光纤以太网网络结构如图2所示。

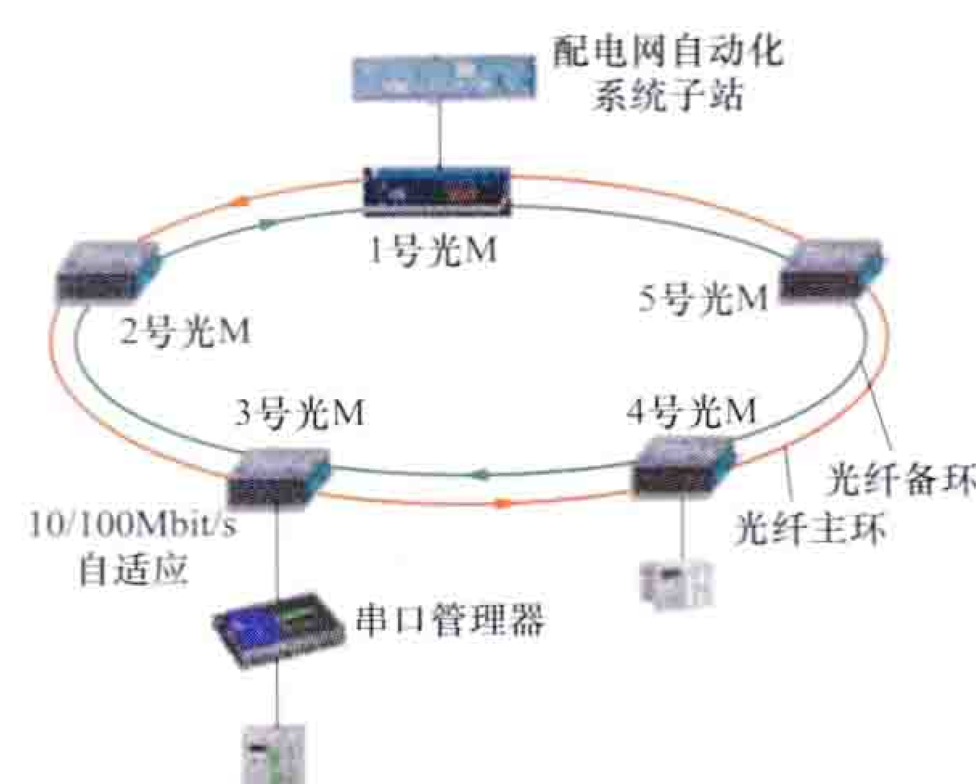


图2 工业光纤以太网网络结构
M—调制解调器

以太网无源光网络（ethernet passive optical network，EPON）是采用以太网技术的无源光网络（PON）。它采用点到多点网络结构、无源光纤传输方式，是一种能够提供多种综合业务的宽带接入技术。

EPON系统由网络侧的光线路终端（optical line terminal，OLT）、用户侧的光网络单元（optical network unit，ONU）和光分配网络（optical distribution network，ODN）三部分组成，可以组成树形、链形等拓扑结构。ODN由光纤和一个或多个无源分光器（passive optical splitter，POS）和光纤连接器等相关无源光器件组成，在OLT和ONU间提供光传输通道。其拓扑结构如图3所示。

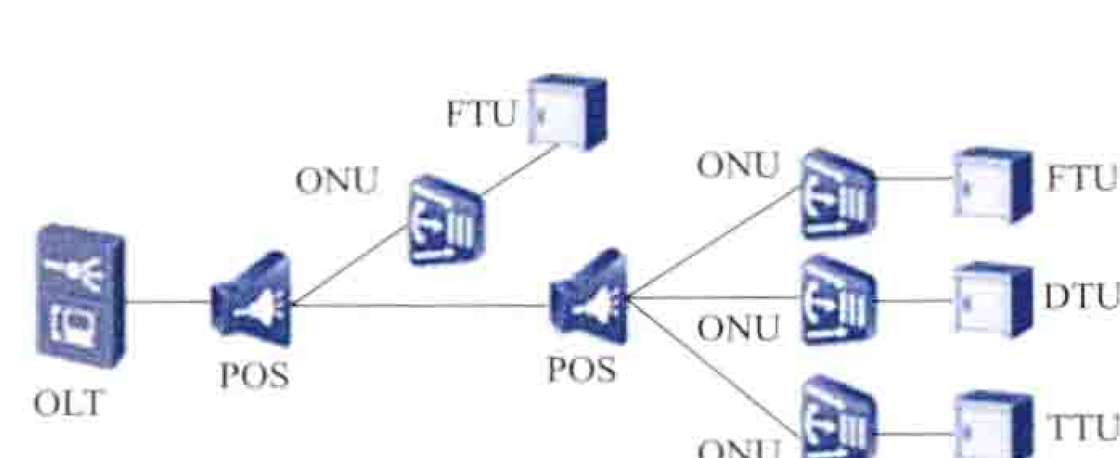


图3 EPON拓扑结构

EPON的技术特点包括：①长距离，高带宽（20km，1.25Gbit/s）。②支持ONU设备的自动测距和自动加入，网络扩展方便。③无源光纤传输方式。在一个站点失去电源时，仅仅是该站点无法正常通信，并不影响整个光纤环路的正常工作。④节省光纤资源。采用波分多路复用技术，能够利用一根光纤实现数据双向传输。⑤带宽分配灵活。⑥组网结构相对单一。⑦对以太网之外的业务支持能力较差。⑧链路的延伸受到一定的限制。

无线通信 利用电磁波信号传递信息的通信方式。无线通信具有安装方便、成本低、抗自然灾害能力强等优点，对于城市郊区、农网中一些偏远的站点来说，敷设光纤成本比较高，是一种很好的替代解决方案。无线通信按照网络性质分为无线公网和无线专网。

无线公网 社会上电信运营商提供的公共无线网络。应用于配电网自动化通信系统的无线公网主要是GPRS/CDMA技术。

GPRS（general packet radio service，通用分组无线服务）能够满足可持续传送业务数据的需求，并且能够进行实时的交互数据传送。能够满足配电网远程电能抄表、配电变压器监控以及分散在边远地区的配电网自动化系统终端的通信要求。

CDMA（code division multiple access，码分多址）是根据美国标准（IS-95）设计的频率在900～1800MHz范围的数字移动电话系统。在中国受信号覆盖范围等因素的影响，不如GPRS在配电网自动化通信系统中应用广泛。

无线专网 利用无线通信技术组成的专用网络。应用于配电网自动化通信系统的无线专网主要有窄带数传电台、扩频电台、宽带无线通信等形式。

（1）窄带数传电台。简称数传电台。应用无线超短波信号进行数据传输，由发射机、接收机以及调制解调器3部分组成，支持点对点或点对多点串行通信方式，具有发射功率大、覆盖范围广、传输时延小等特点，不足之处是需专门申请频点。中国用于工业控制的数传电台的频段为223.025～235.000MHz与821～870MHz。

（2）扩频电台。采用专门的调制技术，将调制后的信息扩展到很宽的频带上去传输，传输信息的射频带宽远大于信息本身带宽；在接收端采用与发送端相同的扩频码进行解调，还原发送的数据信息。它具有网络与串行通信接口，支持点对点、点对多点、点对点对等通信方式，具有发射功率低、不用申请无线频点、网络自愈、抗干扰能力强等特点，在配电网自动化通信系统的应用多于窄带数传电台。

（3）宽带无线通信。能够提供宽带接入能力的一种无线通信方式，WiMAX和McWiLL是可应用于配电网自动化通信系统的两种主要宽带无线通信技术。WiMAX的产业规模以及技术和设备水平还在发展过程中，McWiLL也只在中国配电网自动化系统中得到试点应用。

配电线载波 将信息调制在高频载波信号上、通过配电网线路进行传输的通信方式。主要用于自动读表系统，解决用户电能表到安装在公共配电变压器处的数据集中器之间的通信问题。在实际工程中，配电线载波通常利用配电电力电缆的绝缘屏蔽层（外屏蔽层）作为通道，信号在屏蔽层与大地（金属护套）之间传播，又称电缆屏蔽层载波。电缆屏蔽层载波包括注入式电感耦合和卡接式电感耦合两种，用于一段电缆两端之间的通信，当跨越两段电缆时，需要使用信号耦合网桥进行通信连接。网桥对载波信号的衰减较大，当级数较多时（如三级以后），可能因为信号衰减过大而无法可靠通信。必要时，可使用载波中继技术进行分级组网。

电缆屏蔽层载波具有投资小、易于实施、受外力破坏的机会较小的优点，其不足之处是通信受一次系统电压、电流变化的干扰影响，易出现误码。

注入式电感耦合 载波信号通过一耦合变压器注入电缆屏蔽层与大地之间的回路中，如图4（a）所示。电缆正常运行时，三个线芯的屏蔽层和金属护套都是接地的；安装耦合设备时，需把屏蔽层的接地解开，将耦合变压器接在屏蔽

层与大地之间，一般情况下需要停电安装。注入式耦合的信号耦合效果好，信号传输距离一般大于5km。

卡接式电感耦合　载波信号通过卡接式耦合器铁芯内的高频线圈耦合到电缆上，如图4（b）所示。安装时直接将耦合器卡在电缆上，不需要停电、施工方便。卡接式耦合的信号耦合效果相对较差，受护层绝缘不良、大地电导率等因素的影响，信号传输距离有限，一般不超过5km。

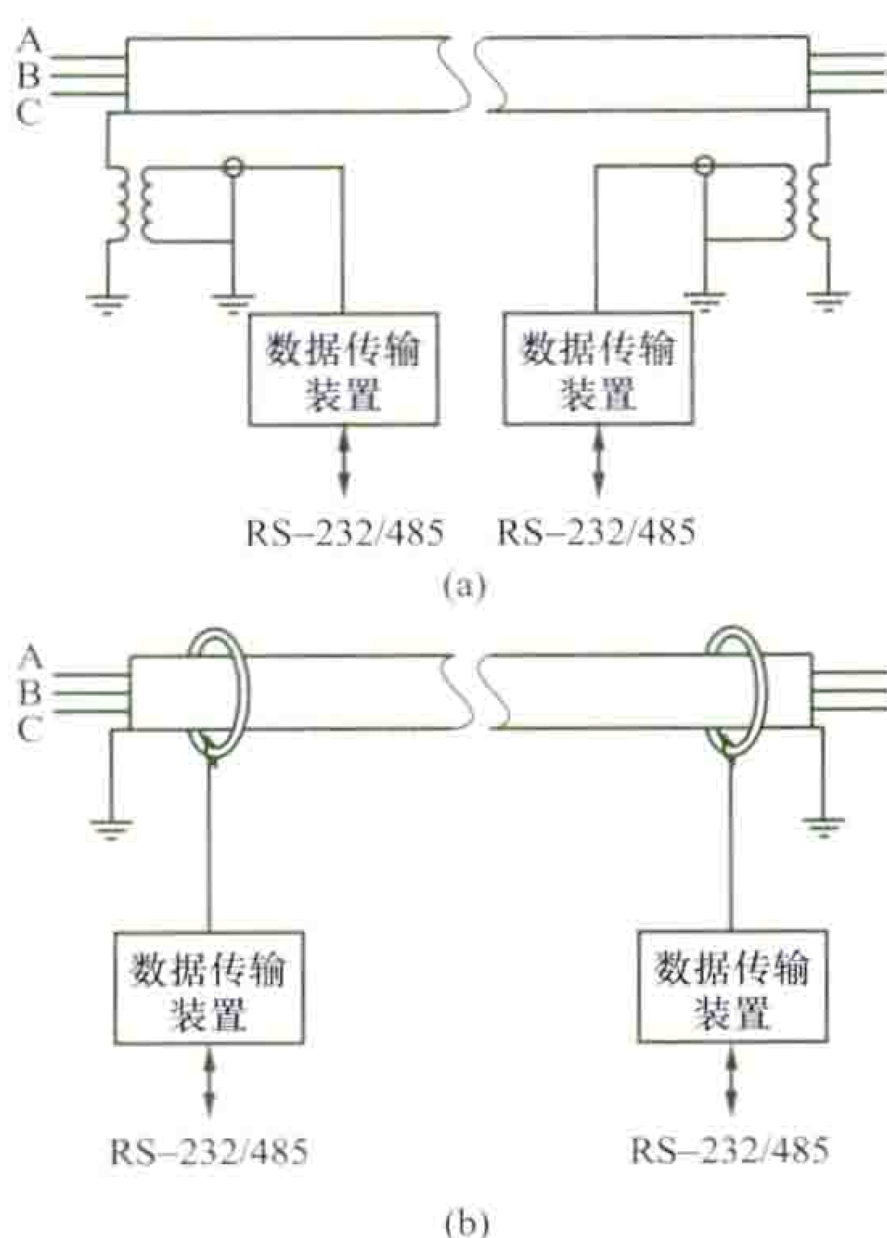


图4　电缆屏蔽层载波

（a）注入式电感耦合；（b）卡接式电感耦合

通信协议　常规配电网自动化通信协议主要有IEC 60870-5-101、IEC 60870- 5-104、DNP3.0。

IEC 60870-5-101通信协议用于配电网自动化通信系统时，需要针对其应用特点进行必要的修改、补充，如扩展站址数等。配电网自动化通信系统中使用的串行通道一般都是半双工的点对多点结构，使用非平衡传输方式，在这种通道结构下，该协议不支持分站端主动上报数据，主站端只能采用问答方式读取开关变位、故障等异常事件信息。

IEC 60870-5-104通信协议是在IEC 60870-5-101的基础增加了传输控制协议/因特网互联协议层次的网络通信协议，支持分站端主动上报数据，此外，还支持分站端之间对等通信交换数据，实现分布式智能控制。（见馈线自动化）

DNP3.0支持分站端主动上报信息方式，在北美地区有着广泛的应用，中国早期的一些配电网自动化通信系统也有使用。

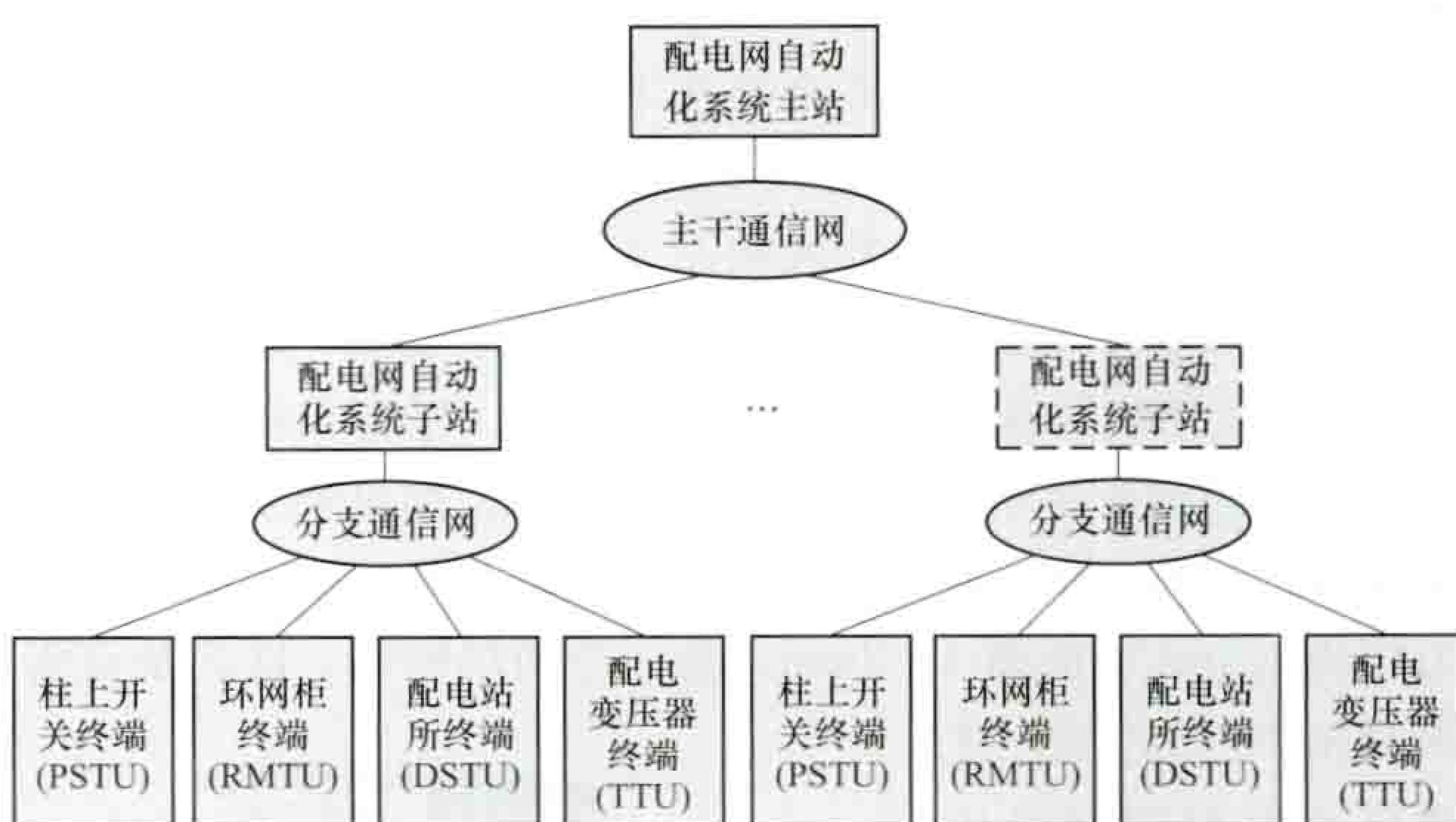
展望　使用网络交换机作为通信网关连接主干通道与分支通信网，实现配电网自动化系统终端与主站之间的透明传输，满足在广域数据网络上的两点之间进行对等通信的需要，实现分布式智能控制。采用IEC 61850通信协议体系解决配电网设备的互操作与即插即用，减少安装调试与维护工作量并降低系统造价。

peidianwang zidonghua xitong

配电网自动化系统

（distribution network automation system）　对配电网进行实时监视和控制，完成配电网运行自动化功能的自动化系统。基本系统是配电网数据采集与监控系统，以其为基础实现馈线自动化、网络拓扑分析、状态估计、潮流计算、短路计算、合环分析、负荷预测、网络重构等配电网自动化高级应用功能。

基本构成　由配电网自动化系统主站、配电网自动化系统子站、配电网自动化系统终端和配电网自动化通信系统构成，如图所示。为更好地完成各项配电网运行自动化功能并为其他业务提供数据支持，需要与配电地理信息系统（配电GIS）、配电生产管理系统（DPMS）以及上一级调度自动化系统（EMS）、营销管理信息系统（包括客户信息系统、负荷管理系统、自动读表系统、用户电话呼叫管理系统等）互联，进行系统集成。（见配电自动化系统集成）



配电网自动化系统构成示意图

配电网自动化系统主站　布置在控制中心内，对采集到的配电网运行数据进行加工、处理，为调度人员提供配电网运行监视和远方控制与调节的人机界面计算机子系统。（见配电网自动化系统主站）

配电网自动化系统子站　安装在变电站或开闭所内，收集处理一个供电小区内配电网自动化系统终端数据的自动化装置，简称配电子站。（见配电网自动化系统子站）

配电网自动化系统终端　布置在现场配电设备处，与配电网自动化主站通信，完成数据采集与控制功能的自动化装置，简称配电网终端或配电终端。（见配电网自动化系统终端）

配电网自动化通信系统　完成配电网自动化系统中各类业务信息传输的通信系统。配电网自动化系统主站与配电子站之间的通信系统称为主干通信网，配电子站与配电网终端之间的通信系统称为分支通信网。（见配电网自动化通信系统）

主要功能　包括数据采集与监控、配电网自动化高级应用功能。（见配电网数据采集与监控系统）

主要特点　包括：①监控对象为中低压配电网中的配电设备，监控节点众多、分布区域广。②相当一部分配电网终端设备安装在户外，运行环境恶劣，温度通常在－25～＋80℃，湿度高达90%，此外，还需要考虑防雨、防晒、防雷、防风沙、防振动与强电磁干扰等。③一次设备标准化程度低，相当一部分设备的信息采集比较困难，配电网自动化系统主站难以完整、全面地获取配电网运行数据。一些开关设备没有电动操动机构，不具备辅助触点，难以实现遥控以及对开关状态进行监控。④需要具有完善的故障信息采集与处理功能。除完成故障定位、隔离与恢复供电功能外，还要能够对故障信息进行存储、分析、查询、统计。⑤运行监控主要关注异常运行状态与故障的处理，对模拟量测量精度要求相对较低，对数据刷新周期的要求也不高。为减少通信与主站数据处理负担，配电网终端一般采用“主动报告”机制，在检测到开关变位、故障等事件时即时上报，而正常量测数据的刷新周期则可选为数分钟甚至数十分钟。⑥配电网异动率很高，结构经常因增容、技术改造、城市建设等原因变化，需要及时地更新系统网络拓扑与属性数据，参数配置、系统维护工作量大。⑦需要与调度自动化系统、配电生产管理系统等频繁交换数据，对系统设计的开放性要求高。

发展与展望 随着智能配电网技术的发展，配电网自动化系统将向高级配电网自动化系统发展，实现配电网运行的全面协调控制与自动化。①支持分布式电源的大量接入并将其与配电网进行有机地集成，满足分布式电源高度渗透的配电网的监控要求。②具有良好的开放性与可扩展性，能够实现终端设备与系统主站的即插即用。③除基于系统主站的集中控制应用外，还支持基于智能终端之间对等交换实时数据的分布式智能控制应用，为各种高级应用提供统一的支撑平台，使系统的软硬件资源高度共享。

peidianwang zidonghua xitong zhongduan

配电网自动化系统终端 (remote terminal of distribution network automation systems) 布置在现场配电设备处，与配电网自动化系统主站通信，完成数据采集与控制功能的自动化装置，简称配电网终端或配电终端。安装在配电网开闭所、配电所（室）、箱式变电站、环网柜、柱上开关、配电变压器等处，实时采集并向配电网自动化系统主站上传配电网的运行参数与故障信息，接受其控制命令，实现对配电设备的远程控制；此外，还能够利用自身测量信息完成各种就地控制与保护功能。配电网终端功能丰富、种类众多且有户内与户外两种运行环境，在实际工程中，需根据具体的应用场合，选择具体的安装方式、防护等级以及配置相应的功能、输入/输出容量、通信接口。

分类 根据监控对象的不同，分为配电站所终端（distribution substation terminal unit，DSTU）、环网柜终端（ring main terminal unit，RMTU）、柱上开关终端（pole-top switch terminal unit，PSTU）、配电变压器终端（transformer terminal unit，TTU）等四大类。在实际工程中，习惯把配电站所终端、环网柜终端称为DTU（distribution terminal unit），把柱上开关终端称为FTU（feeder terminal unit）。图1～图4为不同外形的环网柜。



图1 分布式环网柜



图2 柜外立式环网柜

功能 包括测量、短路故障检测、小电流接地故障检测、保护、控制、通信等功能。

测量功能 包括数据采集、电能质量监测、相量测量、负荷监测等。

（1）数据采集。包括模拟量和开关量的采集。模拟量包括电压、电流、频率、有功/无功功率、视在功率、功率因数、有功/无功电量、零序电压/电流、负序电压/电流以及后备电源电压、电流和环境温度等；开关量包括开关辅助触点信号、开关储能机构储能信号、SF_6开关压力信号等。



图3 柜内立式环网柜



图4 柜内壁挂环网柜

（2）电能质量监测。采集记录谐波、电压暂降以及电压闪变等参数。（见供电质量）

（3）相量测量。采集电压、电流的幅值与相位信息。一些配电网的保护与控制应用需要测量配电网不同站点的相量信息，如合环操作时需要测量合环点两侧系统的电压相量并计算它们之间的相量差，以判断合环操作引起的冲击电流是否会危害系统运行安全。

（4）负荷监测。采集、统计配电变压器低压侧的运行数据，包括电压、电流、有功/无功功率、有功/无功电量与停电时间等。

短路故障检测功能 检测相间短路故障与中性点小电阻接地系统（见中压配电网中性点接地方式）中的单相接地短路故障。配电网终端在检测到短路故障后，记录并向配电网自动化系统主站报送故障信息供其进行故障定位。

相间短路故障检测采用过电流检测原理，电流整定值的选择原则是躲过最大负荷电流值；单相接地短路故障检测采用零序电流越限原理，整定原则是躲过系统正常运行时的最大不平衡电流值。在检测到配电网发生短路故障后，配电网终端还应记录并向主站报送故障电流幅值以及故障发生时刻、故障历时等信息；在采用闭环运行方式的配电环网中，还要能够测量并上报故障电流方向。

小电流接地故障检测功能 检测中性点非有效接地系统的单相接地故障（简称小电流接地故障）。配电网终端在检测到小电流接地故障后，记录并向配电网自动化系统主站报送故障信息，供其进行故障定位。

小电流接地故障定位方法主要有零序电流定位法、注入信号定位法、暂态定位法。当采用零序电流定位法时，配电网终端需要测量并向主站报送工频零序电流的幅值。如果采用注入信号定位法，配电网终端需要测量并向主站报送流过监测点的注入电流信号的幅值。对于暂态定位法来说，配电网终端则需要记录并向主站报送暂态零序电流与电压录波数据。

保护功能 检测配电网故障并向所控制的断路器发出切除故障元件的跳闸命令，包括三段电流保护、零序电流保护、反时限电流保护、自动重合闸等（见配电网电流保护、配电网自动重合闸）。当配电网终端用作与变电站出线断路

器、开闭所进出线断路器以及配电所进线断路器配套的保护测控装置时，需要配置保护功能。

控制功能　包括远方控制、就地控制、分布式智能控制功能。

（1）远方控制。接受配电网自动化系统主站的控制命令，完成开关分合闸输出控制以及备用电源自投、蓄电池活化、线路变压器调压、无功补偿电容器投切等开关量输出控制。

（2）就地控制。基于当地量测量，不依赖于配电网自动化系统主站完成的控制应用，如用户分界开关控制（见自动分界开关）、变压器无功补偿电容投切控制等。

（3）分布式智能控制。配电网终端之间通过对等通信网络交换数据，对采集到的数据进行处理，不依赖配电网自动化系统主站指令完成的控制应用。分布式智能控制能够利用多个站点的测量信息，具有更为完善的控制性能以及较快的控制响应速度，是一种非常有前途的控制方式。

通信功能　包括远程通信与当地通信。①远程通信即与配电网自动化系统主站或子站通信。通常采用网络通信（Ethernet）或串行通信（EIA RS-232）方式，常用的通信规约有 IEC 60870-5-101、IEC 60870-5-104、DNP3.0 等。②当地通信包括数据转发通信、级联通信以及维护通信。数据转发通信用于转发附近其他智能装置的数据，通常采用 RS-485 接口；级联通信用于开闭所、环网柜与配电所内多台终端之间的通信，一般采用现场总线（CAN 或 LON）；维护通信指将终端的维护接口与便携式 PC 机相连对终端进行整定配置和维护的通信，采用的通信接口形式有 USB 接口、RS-232 接口、以太网接口。

功能配置　不同类型配电网终端的功能配置见表。

不同类型配电网终端功能配置表

功　能	配电站所终端	环网柜终端	柱上开关终端	变压器终端
数据采集	√	√	√	√
电能质量监测	*	*	*	√
相量测量	*	*	*	—
负荷监测	*	*	*	√
短路故障检测	√	√	√	*
小电流接地故障检测	√	√	√	—
保护	*	*	*	—
远方控制	√	√	√	√
就地控制	√	√	√	*
分布式智能控制	√	√	√	—
数据存储	√	√	√	√
数据处理与转发	*	*	*	√
通信	√	√	√	√

注："√"表示必备功能，"*"表示选配功能，"—"表示该项功能不适用。

基本构成　配电网终端一般由测控单元、人机接口、通信终端、操作控制回路、电源等部分构成，如图 5 所示。

测控单元　主要完成数据采集与处理、故障检测与故障信号记录、保护、控制、通信等功能。主流产品都采用平台化、模块化设计，其输入量、输出量与通信接口的形式与数量根据实际需要配置，其结构形式有平铺式和插箱式两种，如图 6 所示。①平铺式结构。主要用于柱上开关终端和变压器终端，其输入、输出数量相对固定，通常只需要完成一条线路的测控。②插箱式结构。用于配电站所终端、环网柜终端，其输入、输出量较多，需要完成多条线路的测控，一般由电源插板、CPU 插板、模拟量插板、开关量插板、控制量插板、通信插板以及标准 19in/4U 或 6U 插箱组成，各功能插板数量可以根据实际需要进行配置。

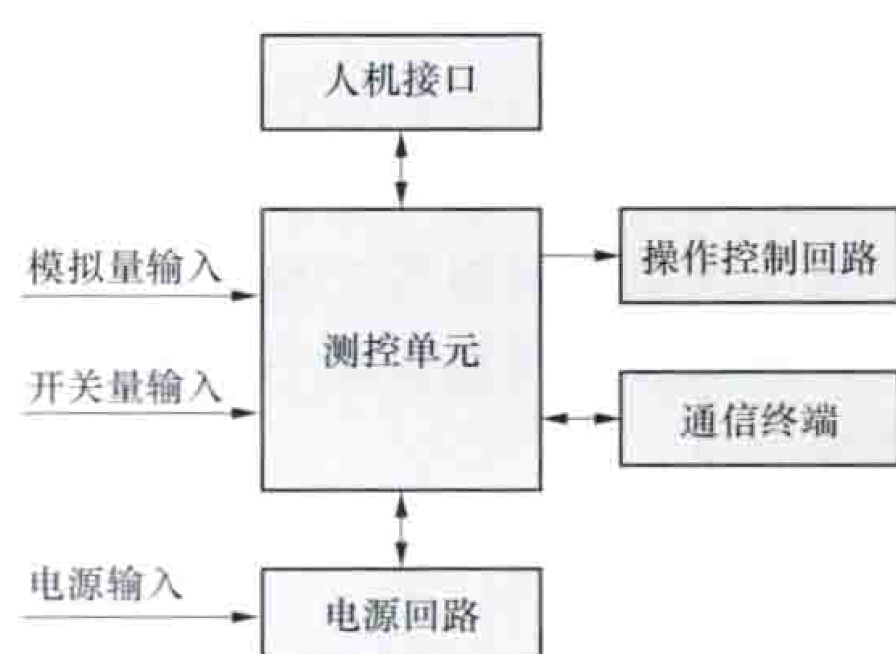


图 5　配电网终端的基本构成

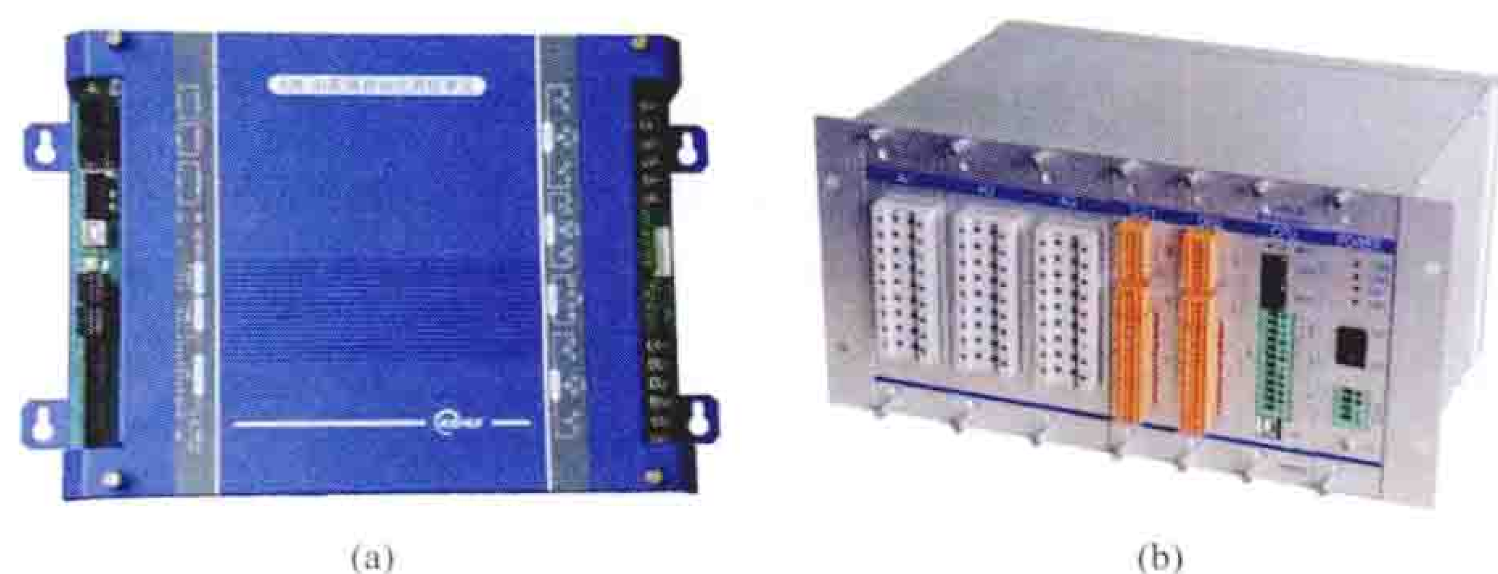


图 6　典型配电网终端测控单元
（a）平铺式；（b）插箱式

人机接口　用于终端配置维护和运行监视，包括状态指示灯以及液晶面板、操作键盘。状态指示灯用于指示终端的各种运行状态，便于操作、维护，主要包括电源指示灯、故障指示灯、通信指示灯、后备电源指示灯、保护动作指示灯以及开关分合闸状态指示灯等。液晶面板和操作键盘用于显示测量数据、运行参数配置与维护。由于液晶面板受环境温度的影响较大，为简化装置构成、提高可靠性，大多数终端不配备液晶显示面板和操作键盘，通常使用便携式 PC 机，通过维护通信口对其进行配置与维护。

通信终端　与测控单元的通信接口连接，实现与配电网自动化通信系统的连接。根据所连接的通信通道类型的不同，分为光纤终端、无线终端、调制解调器（用于模拟通道、载波通道）等。

操作控制回路　用于开关分合闸当地操作控制，包括开关操作方式转换和开关当地操作两部分。开关操作方式转换部分由转换开关和相应的状态指示组成，用以选择就地、远方以及闭锁 3 种开关操作方式；开关就地操作部分包括分合闸连接片、分合闸按钮及其开关状态指示。

电源回路　提供终端本身、通信终端以及开关分合闸操动机构所需电源。通常提供直流 24V 或 48V 电压等级。配电站所终端通常使用站所内交流不间断电源（UPS）提供备用电源。环网柜终端、柱上开关终端（见图 7）配备储能装置（铅酸免维护蓄电池、超级电容器等）作为备用电源，通常要求能够维持运行 8h 以上（使用超级电容器时维持运行在 0.5h 以上），并能满足开关分合闸操作不少于 3 次。配电

变压器终端通常采用储能电容作为备用电源，维持运行数秒的时间。



(a) (b)

图 7 柱上开关终端现场安装情况
(a) 双线路分段开关监控；(b) 用户分界开关监控

展望 随着智能电网技术的进步，配电网终端向高智能化的综合自动化装置发展。产品设计采用开放式平台设计思想，可为智能配电网各种保护控制功能（应用程序）提供统一的支撑平台。硬件设计模块化，易于扩展；采用 RISC 微处理器（MCU）、高性能数字信号处理器（DSP）、大规模现场可编程逻辑阵列（FPGA）等高性能器件，具有强大的数据处理能力与丰富的内存资源。软件设计基于实时多任务操作系统，采用层次化结构，将数据与应用分离，应用程序通过程序访问接口（API）访问底层资源和数据，可方便地加载、卸载应用程序，实现即插即用。功能综合化，提供类似 PC 机的软件开发环境，除实现传统功能外，能够通过通信网络对等通信，相互交换数据，实现分布式智能控制，如配电线路故障的快速定位、隔离与自动恢复供电。配电网终端的通信遵循 IEC 61850 变电站通信协议体系，支持统一的信息模型和信息交换模型，具备自描述、自动配置、自动注册与自动发现等功能，可以实现即插即用。

peidianwang zidonghua xitong zhuzhan

配电网自动化系统主站 (master station of distribution network automation systems) 配电网自动化系统中布置在控制中心内，对采集到的配电网运行数据进行加工、处理，为调度人员提供配电网运行监视和远方控制与调节的人机界面计算机子系统。它是配电网自动化系统的核心，录入、保存配电网网络拓扑信息，采集、处理配电网实时运行数据，自动完成配电网各种协调控制功能，为运行人员提供图形化配电网实时监控界面，并支持通过信息交互总线与配电生产管理系统等其他相关系统交换数据。

基本构成 由计算机硬件系统和软件系统两大部分构成。

硬件系统 包括服务器、工作站、网络设备、同步时钟等设备。其典型配置如图 1 所示。

服务器主要包括 DSCADA（配电网数据采集与监控）服务器、历史数据服务器、高级应用服务器、数据采集服务器、通信接口服务器、Web 服务器等，一般采用双机、双网冗余配置，选用兼容性好、易维护的通用服务器或者小型机，并采取多种容错措施，如双 CPU、双电源、双风扇等。

工作站主要包括调度员工作站、高级应用工作站、维护工作站、报表工作站等。调度员工作站为调度运行人员提供人机联系界面，完成各种人机交互功能。高级应用工作站运行配电网自动化高级应用软件，为配电网安全与优化运行提供决策支持。维护工作站用于主站系统网络、通信、应用进程的调试、参数维护等工作。报表工作站完成系统报表管理功能，自动生成电子报表。

网络设备主要包括交换机、防火墙、物理隔离装置等。主站系统一般采用双局域网结构，可工作在主/备方式或负载分担方式。物理隔离装置是用于安全区之间的防护装置，包括正向型和反向型两种。正向型用于安全区Ⅰ/Ⅱ到安全区Ⅲ的单向数据传递，采用非网络传输方式实现网络的信息和资源共享，可以识别非法请求并阻止超越权限的数据访问和操作，从而有效地抵御病毒、黑客等通过各种形式发起的恶意破坏和攻击活动；反向型用于安全区Ⅲ到安全区Ⅳ的单向数据传递，内嵌智能 IC 卡读写器，在实现安全隔离的基础上，采用数字签名技术和数据加密算法保证反向应用数据传输的安全性。

同步时钟为系统各节点提供统一的标准时间。配置全球定位系统（GPS）时钟或者北斗系统时钟，具备网络对时功能。

软件系统 由操作系统、支撑平台和应用软件组成，如图 2 所示。

常用的操作系统主要有 Unix、Linux、Windows 等，一般推荐服务器采用 Unix、Linux 操作系统，工作站可以采用 Unix、Linux、Windows 操作系统。实际应用中，可采取将可靠性与使用方便相结合的折中方案，对可靠性要求高的服

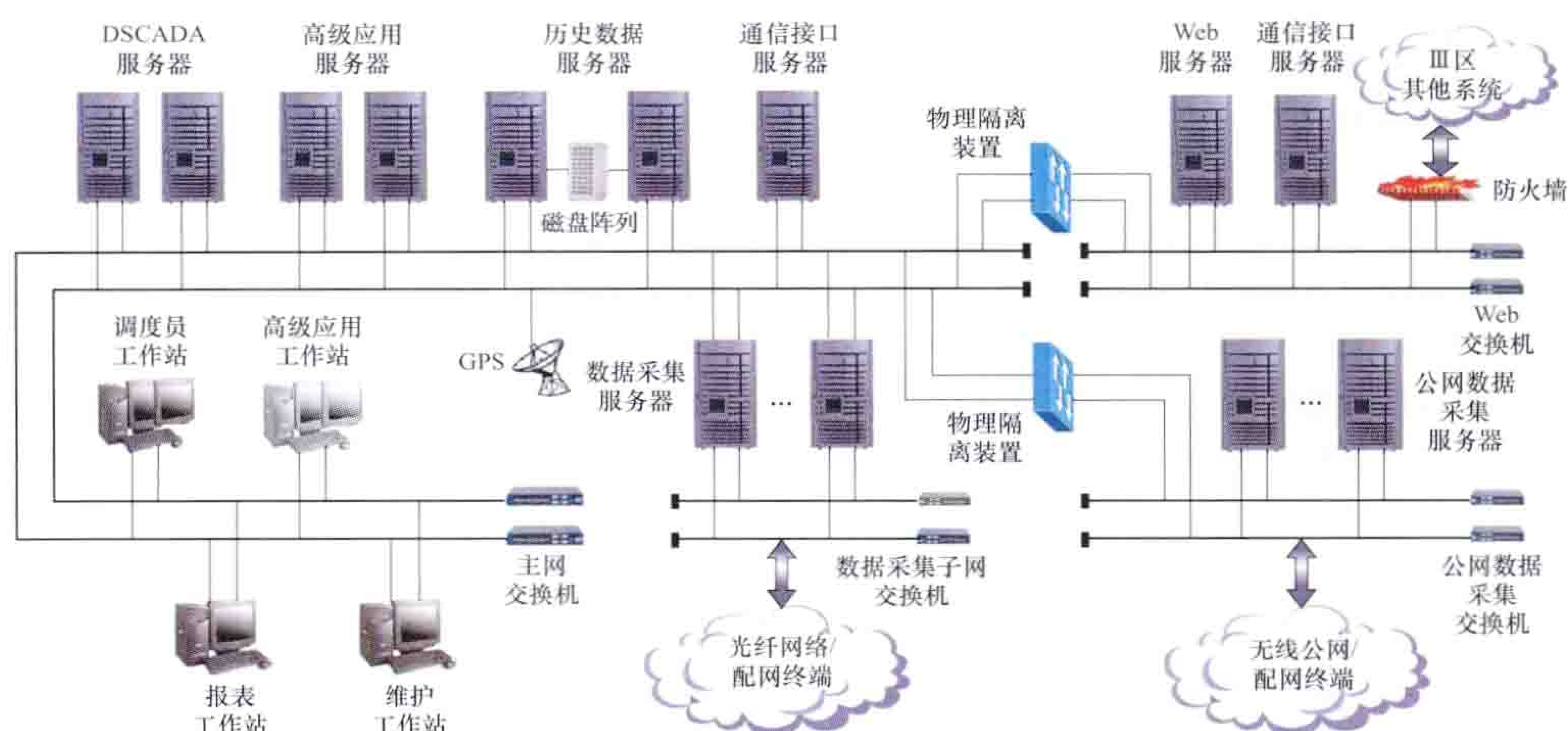


图 1 配电网自动化系统主站硬件系统配置示意图

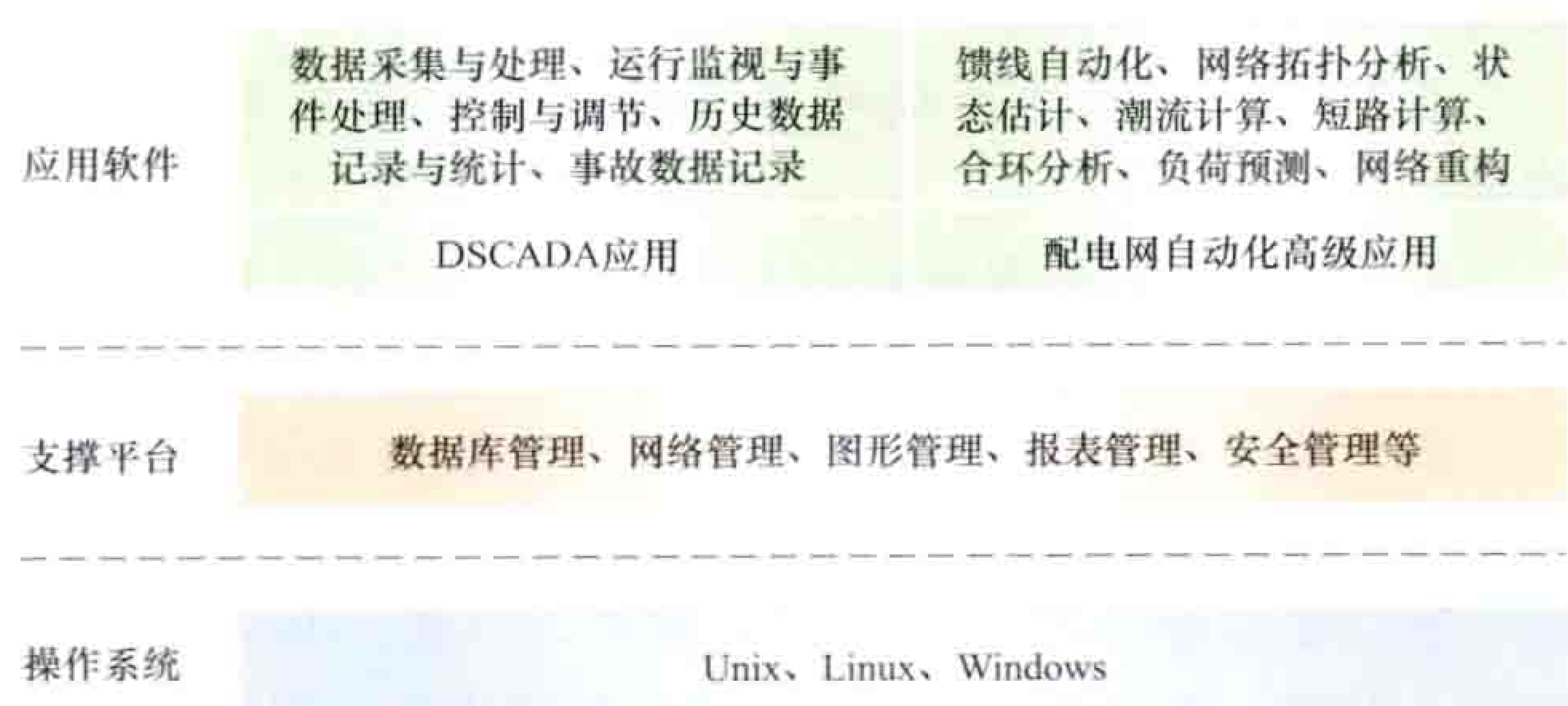


图2　配电网自动化系统主站软件系统配置示意图

务器选用Unix、Linux操作系统，而工作站选用通用、易于掌握的Windows操作系统。

支撑平台又称支撑软件或支撑环境，在操作系统基础上构建，为具体应用软件提供数据存储、处理、显示、制表以及网络通信、数据交换、系统管理服务。支撑平台介于操作系统与应用软件之间，直接决定了系统是否具有良好的开放性及扩展能力，主要由数据库管理、网络管理、图形管理、报表管理、安全管理等组成。

应用软件是在操作系统、支撑平台基础上开发的实现配电网应用功能的程序。通过应用程序接口访问数据库系统的数据，实现应用程序与数据分离，方便开发新的应用程序，而不必改变数据库的结构。应用软件包括数据采集与处理、运行监视与事件处理、控制与调节、历史数据记录与统计、事故数据记录等DSCADA应用和馈线自动化、网络拓扑分析、状态估计、潮流计算、短路计算、合环分析、负荷预测、网络重构等配电网自动化高级应用。

主要功能　包括DSCADA应用功能和高级应用功能。支持通过信息交互总线实现与其他相关系统的信息集成、功能整合及互动化应用。（见配电网数据采集与监控系统、配电网自动化高级应用）

主要类型　包括监控型主站、集成型主站、智能型主站3种。

监控型主站　实现完整的DSCADA功能，能够通过与配电网自动化系统终端的配合，实现配电网故障区段的快速切除与自动恢复供电，并可通过与配电生产管理系统、上级调度自动化系统等其他应用系统的互联，建立完整的配网模型，实现基于配电网拓扑的各类应用功能，为配电网生产和调度提供较全面的服务。适用于配电一次网架和设备比较完善，配电网自动化和信息化基础较好且具备相应条件的地区。

集成型主站　在监控型的基础上，通过信息交互总线实现与相关应用系统的互联，整合配电信息，外延业务流程，扩展和丰富配电网自动化系统的应用功能，支持配电生产、调度、运行及用电等业务的闭环管理，为配电网安全和经济指标的综合分析以及辅助决策提供服务。适用于配电一次网架和设备条件比较成熟、配电网自动化系统初具规模、各种相关应用系统运行经验较为丰富的地区。

智能型主站　在监控型或集成型的基础上，通过扩展配电网分布式电源/储能装置/微电网（见有源配电网、分布式电源并网技术、分布式电源并网保护）的接入及控制功能，在快速仿真和预警分析的基础上进行有源配电网自愈控制，并通过配电网络优化和提高供电能力实现配电网的经济优化运行，以及与其他应用系统的互联。适用于已开展或拟开展分布式电源/储能/微电网建设，或配电网的安全控制和经济运行辅助决策有实际需求，且配电网自动化系统和相关基础条件较为成熟完善的地区。

发展与展望　早期的配电网自动化系统主站功能设计偏离配电网数据采集能力，试点线路数量比较少，采集配电网运行数据有限，造成配电网自动化高级应用功能难以发挥应有的作用，使配电网自动化系统的规模效应难以发挥。智能型主站能够适应分布式电源的大量接入，对有源配电网的运行状态进行连续的在线诊断与评估，实现其故障自愈、灾变自愈和电能质量自愈，能够进行智能调度分析，对分布式电压无功资源进行协调控制，提高有源配电网经济运行水平，是配电网自动化系统主站的发展方向。

见配电自动化系统集成。

peidianwang zidonghua xitong zizhan

配电网自动化系统子站

（sub-master station of distribution network automation systems）　安装在变电站或开闭所内，收集处理并转发一个供电小区内配电网自动化系统终端数据的自动化装置，简称配电子站。它是配电网自动化系统的中间层设备，实现所辖范围内配电网自动化系统终端的数据汇集与处理、规约转换与数据转发、通信监视和馈线故障定位、隔离与自动恢复供电（fault location, isolation and service restoration, FLISR）等功能，具有优化通信通道结构、减少配电网自动化系统主站通信与数据处理负担的作用。

分类　按照其实现的功能可分为通信型子站和监控型子站两类。

通信型子站　又称通信处理机，它汇集辖区内配电网自动化系统终端上传的信息并向配电网自动化系统主站转发，同时接收配电网自动化系统主站的控制、对时命令并下发至配电网自动化系统终端，具有当地及远方维护（包括参数配置、工况显示、系统诊断等）、软硬件自诊断及通信通道监视功能。

监控型子站　具备通信型子站的基本功能，在此基础上，根据区域配电网实时拓扑结构，实现故障定位、隔离与自动恢复供电功能，并可将处理结果上报配电网自动化系统主站；此外，还具有人机交互、信息存储和系统安全管理等功能。

应用　设置配电子站可以减少实时测量数据与控制命令的传输处理层次，能够不依赖于配电网自动化系统主站进行FLISR，提高了控制速度与可靠性。在开展配电自动化工作的初期，出于对配电网自动化系统主站处理大量数据能力与稳定性的担心，不少供电企业选择了由配电子站进行FLISR的做法，但设置配电子站也带来了管理层次增加、系统的总体投资与管理维护工作量加大等问题。随着配电网自动化系统主站技术日趋成熟，其数据处理能力与可靠性大为提高，加之可以采用基于对等通信的分布式智能控制提高了FLISR速度，新建的配电网自动化系统一般不再使用监控型子站，只根据通信通道的具体需要设置通信型子站，用以优化配网自动化通信通道结构。

对一些规模不太大的配电网（如县级配电网），监控点不是很多，使用一个配电子站即可构成一个小型的馈线自动化（FA）系统，完成FLISR控制。配电网数据采集与监控（DSCADA）功能由调度自动化系统完成，配电子站与调度自动化系统交换监控数据。这种方式易于建设，投资少，特别适合在已有调度自动化系统基础上扩展馈线自动化功能。

peidianwang ziyu kongzhi

配电网自愈控制 （self healing control for distribution networks） 利用现代传感、计算机控制与通信技术，自动检测配电网中存在的故障隐患或已发生的故障并进行纠正性操作的自动化措施。自愈是电网智能化的重要内容，也是智能电网的主要特征之一，指其对故障的自我预防、自我恢复能力。配电网自愈控制是故障在线监测、诊断、保护与控制技术的总和，它使配电网具有完善的自愈能力，避免故障对配电网安全运行与供电质量的影响或将其影响降至最小。

控制目标 主要是保证配电网安全运行，防止故障引起供电质量扰动或将供电质量扰动范围与程度降至最小，进而避免或减轻用户的经济损失。输电网自愈控制的目标主要是防止故障的联锁反应，保证系统稳定运行；而配电网故障一般不会给电力系统稳定带来实质性的影响，其主要的危害是造成供电质量扰动，因此，配电网自愈控制目标与输电网有着很大的区别。

自愈控制技术 包括在线监测、中性点非有效接地系统单相接地故障（小电流接地故障）电流自动跟踪补偿、故障限流、短路故障继电保护、馈线自动化、电能质量控制、计划孤岛供电等。

在线监测 及时检测出配电网中存在故障隐患的元件，是对存在故障隐患的元件进行纠正性操作，防止出现故障的基础。

小电流接地故障电流自动跟踪补偿 通过对接地电容电流的自动跟踪补偿使流过接地点故障电流尽可能小，故障电弧自动熄弧，配电网恢复正常运行。是一种传统的、成熟且有效的自愈控制技术。（见消弧线圈自动调谐）

故障限流 限制故障电流的幅值，减轻其对配电网的危害以及电压暂降的程度与危害范围。

短路故障继电保护 主要解决故障元件的切除问题，避免事故扩大，引起大面积停电。（见配电网继电保护）

馈线自动化 主要完成故障区段的定位、自动隔离与非故障区段恢复供电功能，能够避免故障引起用户长时停电或减少遭受长时停电的户数。（见配电自动化、馈线自动化）

电能质量控制 利用柔性配电设备（包括静止无功补偿装置、静止同步补偿器、动态电压恢复器、固态开关）避免或缓解故障引起的停电、电压暂降对敏感用户的影响。

计划孤岛供电 利用分布式电源，在主网停电时维持预先设计的配电子系统或微电网的正常供电，避免造成重要用户停电。（见分布式电源并网技术）

自愈控制效果评价 根据供电可靠性与电能质量改进情况，可将自愈控制效果分为完全自愈与部分自愈。

完全自愈 经过纠正性操作，故障没有引起任何用户停电或电能质量指标超出合格范围，没有给用户带来任何经济损失。因为用户在配电网发生故障期间实现安全过渡，又称无缝自愈。例如，在消弧线圈自动调谐的谐振接地系统中发生单相接地故障时，如果接地电弧在消弧线圈补偿电流的作用下自动熄灭，则故障自动消除，不会给用户造成任何影响，达到完全自愈的效果。

部分自愈 经过纠正性操作后，故障引起的遭受供电长时停电（持续时间大于3min）、短时停电（持续时间小于3min）或电能质量指标超出合格范围（主要是电压暂降）的用户数减少，或使电能质量偏离合格范围的程度减轻。

部分自愈效果可用停电或电能质量指标超标影响的用户户数减少的百分比进行量化评价，主要有长时停电、短时停电、电压暂降户数减少的百分比，分别称为长时停电自愈率、短时停电自愈率、电压暂降自愈率：①长时停电自愈率＝实际遭受长时停电的户数/不采用自愈控制措施可能遭受长时停电的户数；②短时停电自愈率＝实际遭受短时停电的户数/不采用自愈控制措施可能遭受短时停电的户数；③电压暂降自愈率＝实际遭受电压暂降的户数/不采用自愈控制措施可能遭受电压暂降的户数。

根据停电恢复速度或电压暂降恢复时间，可对部分自愈的速度进行量化评价。根据停电或电压暂降持续时间对负荷影响的情况，可将自愈速度分成一、二、三级自愈：①一级自愈指恢复时间在一周期至100ms之间的自愈，对普通负荷和一般敏感负荷基本无影响；②二级自愈指恢复时间在100ms～0.5s之间的自愈，对敏感负荷有一定影响，但对普通负荷无影响；③三级自愈指恢复时间在0.5s～3min的自愈，会影响敏感负荷的正常运行，但对普通负荷基本无影响。

发展与展望 传统的小电流接地电流补偿、短路故障保护、重合闸、备用电源自投等技术的作用均是消除或减轻配电网故障的危害，都属于自愈控制技术的范畴。电网自愈的概念最早出自美国电科院（EPRI）与美国能源部于1999年启动的“复杂互动系统”联合研究计划，是智能电网研究的热点内容。智能配电网自愈控制是对传统电网故障保护与控制技术的发展与升华。它充分利用现代传感、通信、计算机、自动控制与电力电子设备技术，提供从故障发生到恢复供电全过程的系统解决方案，最大限度地避免或减轻故障给用户带来的经济损失。

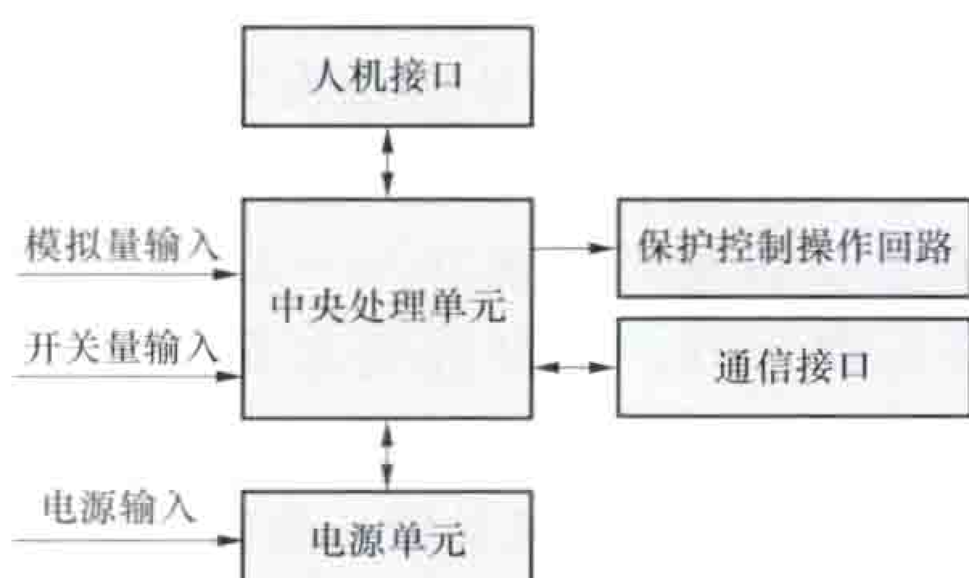
未来智能配电网自愈控制技术的发展特点：①广泛采用环网结构，满足供电可靠性 $N-1$ 要求；在部分对供电质量有严格要求的场合，采用闭式环网并配备快速保护切除故障区段，避免馈线故障引起短时停电。②大量应用非有效接地方式并采用基于电力电子器件的有源跟踪补偿装置，补偿接地电流中的谐波分量与有功分量，进一步减少剩余电流值，提高小电流接地故障自愈率；控制接地电弧熄灭后的电压恢复速度，避免故障电弧的重燃并减轻过电压危害。③故障限流器、固态断路器的研究与应用取得突破，广泛应用柔性配电设备进行电能质量控制。④计划孤岛供电与微电网技术取得突破，达到实用化水平。⑤应用基于先进的传感、通信、控制、快速仿真技术的高级配电自动化、广域保护与分布式智能控制，快速检出故障并进行纠正性操作。

peidian xianlu baohu cekong zhuangzhi

配电线路保护测控装置 (protection, monitoring and control device for distribution lines) 安装在变电站、开闭所、配电所内的中压馈线断路器处，集保护、测量、控制与远程通信功能于一体的继电保护装置。除完成保护功能之外，还能够向配电网自动化系统提供实时数据，并接受遥控命令，是一种具有保护功能的配电网自动化系统终端。配电线路保护测控装置直接采集来自电压互感器、电流互感器的模拟信号，随着电子式互感器的应用，可直接接收来自合并单元数字的采样值。

功能 包括保护、测量、控制和远程通信功能。保护功能包括常规电流、电压保护和低频减载功能等。测量功能包括电流、电压、频率的测量功能，电度量、有功功率、无功功率和功率因数的计算功能，以及故障信息采集记录和故障录波功能，如故障发生时间及历时、电流值、电压值、故障方向等。控制功能包括可接收来自主站的远方控制命令，用户可用专用语言进行编程，设定该装置所需完成的逻辑控制功能。远程通信功能指通过专用通信通道将所采集的信息转发至主站系统，实现调度自动化、配电网自动化功能。

构成 包括中央处理单元、人机接口、输入输出接口、通信接口、电源单元等，如图所示。中央处理单元主要完成数据采集、数据处理以及保护控制决策等功能。人机接口主要完成人机交互功能，包括数据显示、状态指示、参数设定等功能。输入接口主要完成模拟量输入、开关量输入信号的调理与隔离功能；输出接口用于输出跳闸与其他控制命令。通信接口根据通信协议和通信方式的要求，完成保护测控装置与主站之间的通信功能。通常采用串行通信（RS-232）与以太网通信接口。电源单元一般取自变电站的直流电源系统，需要使用DC/DC变换器将外部电源输入转换为多路满足测控装置内部电路供电要求的电源电压。



配电线路保护测控装置构成图

peidian xianlu daoxian

配电线路导线 (distribution line conductor) 配电线路中用于传输电流和配送电能的导电材料。配电线路导线通常以多股金属丝经过机器绞合成型，除具有良好的导电性能外，还需具备较小的温度伸长系数及足够的机械强度，且质量轻，并具有耐振动和抗腐蚀等性能。

导线材料 主要有铜、铝、铝合金、钢和铝分别绞合等。铜的导电性能最好，单位长度的铜线电阻率比铝线要低，而机械强度又高；铝也有较高的导电性能，有较强的抗氧化腐蚀能力，密度小，质量轻，但电阻率高于铜，机械强度和耐酸、碱、盐腐蚀的能力均低于铜；铝合金的导电性能略低于铝，但其强度远高于铝；钢和铝分别绞合是用钢线材做线芯来承受机械强度、铝线材做外层来承担导电性能。

分类及选用 配电线路导线一般分为裸导线和绝缘导线，裸导线按其材质又可分成铝绞线、铜绞线、钢芯铝绞线和铝合金绞线。

铝绞线 由单股铝丝经分层绞合制成，中心层为1股，第一层为6股，第二层为12股，第三层为18股，第四层为24股。铝绞线的耐化学腐蚀能力差，所以不宜架设在化工区和沿海地区。

铜绞线 由单股铜丝经分层绞合制成，其绞合方式与铝绞线类同。在中国，因铜的矿产储备较少，铜绞线价格高，一般不推荐大量使用。

钢芯铝绞线 由单股或多股钢丝绞合成线作为线芯承受机械张力，在钢芯外层覆盖铝绞线作为导体材料的一种复合型绞线，它既利用了铝线较好的导电性能，又利用了钢绞线的高机械强度，在配电线路中得到普遍应用。

铝合金绞线 利用铝合金单丝绞合而成，它的导电性能和机械强度介于铝线和钢芯铝绞线之间。铝合金导线用于原有线路改造且需提高配送电能的场合。

绝缘导线 在裸导线的基础上覆盖一层黑色耐气候型的交联聚乙烯、高密度聚乙烯或聚氯乙烯等绝缘材料而构成，这些绝缘材料具有较好的电气绝缘、抗紫外线老化及耐磨等性能。绝缘导线用于高层建筑附近、人口稠密地区、住宅小区、城市地区以及通过树木园林等场合，随着城市配电网发展和城乡一体化建设的推进，绝缘导线已被广泛应用。

10kV绝缘导线分单芯和三芯两种类型。将裸绞线线芯紧压（紧压系数为0.88～0.92），在线芯外挤包一层0.6mm的半导体内屏蔽层起均匀电场作用，而后再挤包一层2.5mm绝缘材料（称为薄绝缘）或3.4mm绝缘材料，构成单芯分相架设的绝缘导线。在单芯绝缘导线的基础上每根导线外表缠绕金属屏蔽层和绝缘外护套，然后通过机器将3根单芯导线和一根钢绞线绞合，外层用螺旋形绝缘捆扎条固定，构成10kV集束型架空互绞绝缘导线，又称绝缘电缆。钢绞线作为绝缘导线的承力线，金属外屏蔽层和钢绞线均接地。

0.4kV低压绝缘导线分单芯和四芯两种类型。单芯的绝缘厚度在0.6～1.8mm，无半导体内屏蔽层、金属外屏蔽层。4根单芯绝缘导线绞合在一起构成低压四芯集束型绝缘导线，从承力形式上可分为承力束承载、中性线承载和整体自承载3种方式。

导线截面积 配电线路常用的导线截面积有16，25，35，50，70，95，120，150，185，240mm^2等，其中16～25mm^2的导线一般用于低压用户的接户线，50～70mm^2的导线用于中、低压线路的分支线，95～240mm^2的导线用于中、低压线路的主干线。

peidian xianlu jinju

配电线路金具 (distribution fitting) 配电线路上配合导线、绝缘子等使其满足正常工作需要的一种金属器具。按其功能和用途分可分为紧固金具、连接金具、接续金具、拉线金具和保护金具等。还有用于绝缘导线的楔型绝缘耐张线夹、铝合金耐张线夹；用于非承力型的楔型线夹；用于导线修补和切断重接的预绞丝和用于绝缘导线与引线接续

的穿刺型绝缘线夹。

紧固金具　用于固定导线水平荷载的金具。由于导线的水平荷载较大，故对紧固金具的握力要求较高。按其结构和安装条件可分为楔型、螺栓型两种。楔型耐张金具是利用楔块自锁的原理将导线固定在线夹中，适用于裸露导线和绝缘导线剥离绝缘层后安装。螺栓型耐张金具是利用 U 型螺栓和金属压块组合将导线固定在线夹中，适用于裸露导线包上铝包带后安装。

连接金具　用于紧固金具（耐张线夹）、悬式绝缘子或横担等连接的金具。与槽型悬式绝缘子配套的连接金具可由 U 型挂环、平行挂板等组合，与球窝型悬式绝缘子配套的连接金具可由直角挂板、球头挂环、碗头挂板等组合，如图 1 所示。



图 1　连接金具

接续金具　用于配电线路导线与导线、导线与引线的“连接”使其电能荷载得以“延续”的金具，一般可分为非承力型和承力型两类。

常用的非承力型接续金具主要有铝异型平沟线夹，其结构如图 2 所示。

常用的承力型接续金具主要是导线的接续管，它不仅要承受导线的机械张力，还要承受电能荷载的传输。接续管的截面为薄壁椭圆形，钢芯铝绞线用的接续管内附有衬垫，采用钳压对接接续管，如图 3（a）所示；液压对接接续管分为内衬钢接续管和外衬铝接续管，如图 3（b）所示，绝缘导线选用单一材料的液压对接接续管。

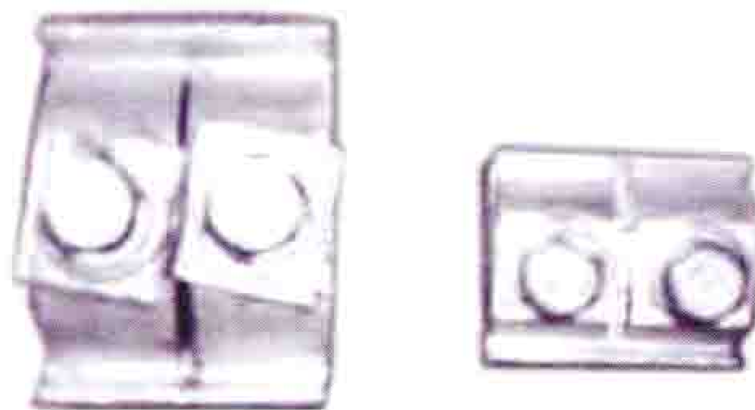


图 2　铝异型平沟线夹



(a)　(b)

图 3　接续管

（a）钳压对接接续管；（b）液压对接接续管

拉线金具　用于固定线路拉线（钢绞线端部）及其配套的金具。拉线金具可以分为楔型线夹、UT 型楔型线夹和二眼板等，如图 4 所示。UT 型楔型线夹的螺栓用来调节拉线的松紧度。

保护金具　用于保护导线，避免因振动引起断股的金具。常用的保护金具有防振锤、护线条和预绞丝修补条等。防振锤、护线条、预绞丝修补条用于大跨越线路（档距在 120m 及以上）导线抗振和导线断股的修补。



图 4　拉线金具

peidian xianlu jueyuanzi

配电线路绝缘子　(distribution line insulator)

将配电线路中有电导体与大地（接地构件之间）进行隔离，并能在自然环境中耐受相应电压、机械应力作用的器件。配电线路绝缘子形状各异，种类繁多。不同类型绝缘子的结构和外形虽有较大差别，但都是由绝缘件和连接金具两大部分组成的。

绝缘子的主要功能是实现电气绝缘和机械固定。当绝缘子挂网运行以后，会受到雷击、污秽、鸟害、冰雪、高湿、温差等环境因素的影响，在电气上要承受强电场、雷电冲击电压、工频电弧电流等的作用，在机械上要承受长期工作重荷载、综合荷载、导线舞动等机械力的作用，因此，绝缘子的基本性能包括电气、机械，还有耐环境和耐老化等性能。根据型号和使用条件的不同，要求对绝缘子进行各种电气的、机械的、物理的以及环境条件变化的试验，以检验其性能和质量。金具则用来配合导线、绝缘子使其满足正常工作需要。（见配电线路金具）

按照绝缘材料的不同，可分为瓷绝缘子、玻璃绝缘子和复合绝缘子；按照结构和用途的不同，可分为针式绝缘子、蝶式绝缘子、悬式绝缘子、柱式绝缘子、棒式绝缘子、瓷横担绝缘子、拉线绝缘子等；按照使用电压等级不同，可分为低压绝缘子和高压绝缘子；按照使用环境条件的不同，派生出污秽地区使用的耐污绝缘子等。

瓷绝缘子　绝缘件由电工陶瓷制成，瓷件表面通常以瓷釉覆盖，以提高其机械强度，防止雨水浸润。瓷绝缘子具有良好的绝缘性能、适应气候的变化性能、耐热性和组装灵活等优点，广泛用于各种电压等级的线路。其金属附件连接方式分球形、槽型和螺栓紧固型等。瓷绝缘子使用最为普遍，其使用寿命一般为 20～30 年。

玻璃绝缘子　绝缘件由经过钢化处理的玻璃制成。具有产品尺寸小、质量轻、机电强度高、电容大、热稳定性好、老化较慢、寿命长、“零值自破”、自洁性好、维护方便等特点，广泛应用于输电线路，配电线路较少采用。玻璃绝缘子的使用寿命一般为 30～40 年。

复合绝缘子　也称合成绝缘子，由绝缘棒芯、硅橡胶伞裙及金属端帽三部分组成，如图 1 所示。绝缘棒芯由环氧树脂玻璃纤维引拔棒制成，抗张强度较高，为普通钢材抗张强度的 1.6～2.0 倍，是高强度瓷的 3～5 倍；伞裙以硅橡胶为基本绝缘体，具有良好的耐污闪性能；金属端帽用于导线金具、杆塔之间的连接，根据负载能力的大小，采用可锻铸铁、球墨铸铁或钢等材料制造而成。复合绝缘子具有抗污闪

性强、强度大、质量轻、体积小等优点，但其承受的抗弯应力较小，且抗老化能力不如瓷和玻璃绝缘子。复合绝缘子的使用寿命一般可达15～20年。


图1 合成绝缘子

针式绝缘子 主要用于直线杆和角度较小的转角杆支持导线，分为高压、低压两种。针式绝缘子的支持钢脚用混凝土浇装在瓷件内，形成“瓷包铁”内浇装结构，如图2所示。


图2 针式绝缘子

蝶式绝缘子 俗称茶台瓷瓶，分为高压、低压两种。在10kV线路上蝶式绝缘子与悬式绝缘子组成“茶吊”，用于小截面导线耐张杆、终端杆或分支杆等。在低压线路上，作为直线或耐张绝缘子，如图3所示。

悬式绝缘子 俗称吊瓶，如图4所示。主要用于架空配电线路耐张杆。悬式绝缘子金属附件的连接方式分球窝型和槽型两种。


图3 蝶式绝缘子

柱式绝缘子 绝缘瓷件浇装在底座铁靴内，形成“铁包瓷”外浇装结构，如图5所示，其用途与针式绝缘子基本相同。采用柱式绝缘子时，架设直线转角杆的导线角度不能过大，侧向力不能超过柱式绝缘子的允许抗弯强度。

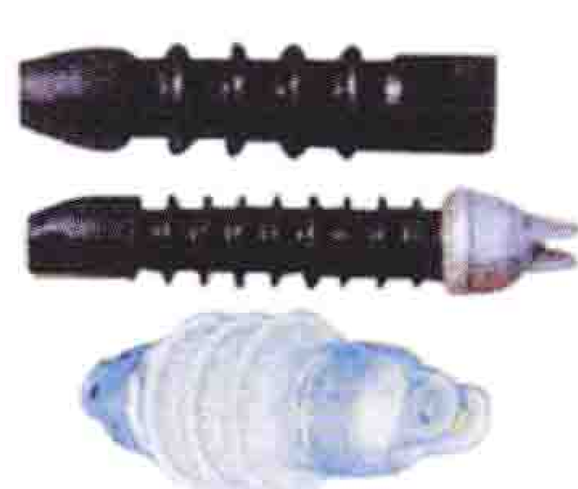

图4 悬式绝缘子

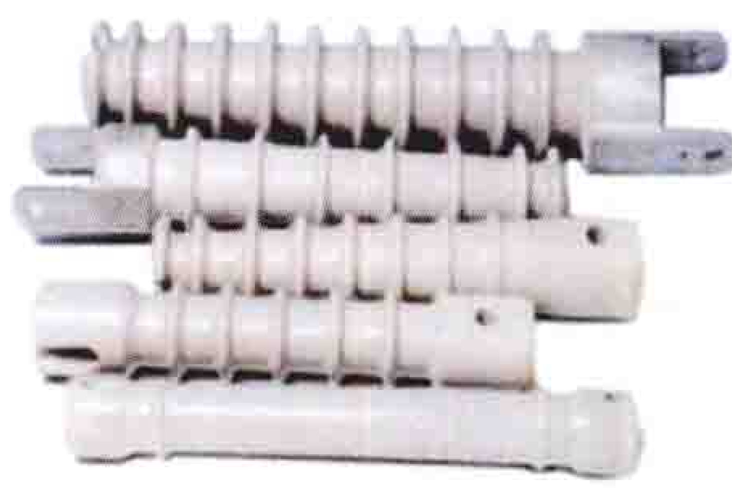

图5 柱式绝缘子

棒式绝缘子 又称瓷拉棒，是一端或两端外浇装钢帽的实心瓷体，或纯瓷拉棒，如图6所示。

瓷横担绝缘子 一端外浇装金属附件的实心瓷件，一般用于10kV配电线路直线杆，如图7所示。

拉线绝缘子 又称隔地绝缘子，一般用于架空配电线路的终端、转角、耐张杆等穿越导线的拉线上，使下部拉线与上部拉线绝缘。


图6 棒式绝缘子


图7 瓷横担绝缘子

peidian xianlu zonglian baohu

配电线路纵联保护 (pilot protection for distribution lines) 利用通信通道比较被保护配电线路端部（保护安装处）电气量的继电保护方式。能够可靠地定位故障区段，无时限地切除故障，具有绝对的选择性，避免了常规配电线路电流保护在快速性与选择性之间的矛盾。可作为配电线路的主保护，其保护范围是被保护线路的全长。

构成 包括保护装置与保护通道。

保护装置 采集并处理配电元件的电压、电流等运行参数，提取故障量并进行状态判别，在配电元件故障或出现异常运行状态时，发出跳闸命令或告警信息。可以与配电网自动化系统终端共用软硬件平台，以降低投资。（见配电网继电保护、配电线路保护测控装置）

保护通道 分为导引线、光纤专用通道、光纤以太网3种。

导引线一般由两根金属导线构成，也可由3根金属导线构成。为减小干扰，导线外有屏蔽层，屏蔽层在两端接地。使用导引线作为纵联保护通道，简单易行、成本低，但抗电磁干扰能力较差，一般用于距离比较短（数千米）的场合。

光纤专用通道是为保护装置敷设的专用光纤通道，在此通道中只传输保护信息。将光缆的纤芯直接接入光端机，不需附加其他设备。光纤专用通道具有传输容量大、信号传输速度快、抗干扰能力强、可靠性高、管理方便的优点，不足之处是成本较高。

光纤以太网由光纤、光配架、光纤收发器、交换机等设备组成。使用光纤以太网作为保护通道可以与配电网自动化通信系统共享通信资源，降低了投资。

用途 ①用于闭环运行的配电网保护。闭环运行的配电网中，短路电流双向流动，传统的电流保护失去选择性，纵联保护通过比较被保护线路端部电气量特征的差异判断是否发生了内部故障，具有绝对的选择性。②用于有源配电网。分布式电源高度渗透的配电网，故障电流双向流动，常规的电流保护难以适应，而采用纵联保护可以解决这一问题。③用于接有对电压暂降敏感的重要用电设备的场合。配电线路故障将会引起母线电压出现暂降现象。如果保护动作速度慢，将导致母线电压暂降持续时间增加，影响敏感设备的正常工作，采用纵联保护能够有选择地快速切除故障。

工作原理 包括电流差动保护与方向比较保护。

电流差动保护 包括相位差动、相量差动与全电流差动3种保护。

（1）相位差动保护。比较被保护线路端部故障电流相位的电流差动保护，又称电流相位差动。保护依据的故障特征为：非故障线路端部故障电流的相位相反（设保护安装处指向线路的方向为正向，并忽略被保护线路的负荷电流与分布

式电容电流），故障线路端部故障电流的相位相同。考虑到电流互感器的传变误差等因素，相位测量存在一定误差，因此在保护判据中留有一定的相位差裕度。

如图1所示，一个双端配电线路的保护判据为

故障线路　$180°+\varphi_m>\varphi>180°-\varphi_m$

非故障线路　$\varphi_m>\varphi>-\varphi_m$

式中 φ 为被保护线路两端故障电流的相位差；φ_m 为相位差最大允许误差，通常设为70°。

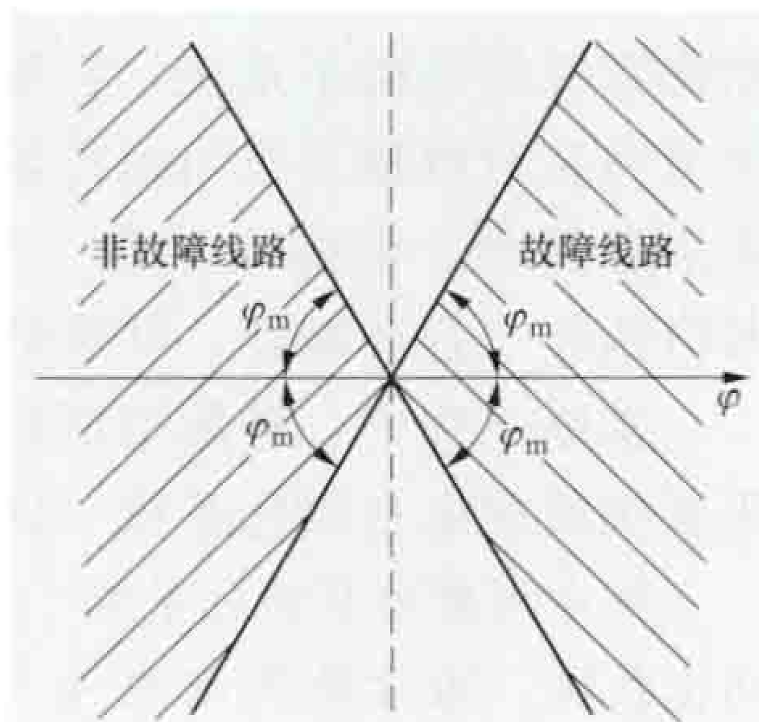


图1　故障线路判断示意图

测量故障电流相位需要时间同步信号，可利用故障电流出现的时刻作为相位测量的参考点。配电线路距离很短，可以忽略故障电流传播时间，认为被保护线路的两端同时接收到故障电流。

(2) 相量差动保护。以被保护线路端部故障电流相量差值为故障量的电流差动保护。保护判据为：本端故障电流与其余端部故障电流的相量差幅值大于门槛值时，判断为发生了区内故障，保护动作；否则，判断为发生了区外故障，保护不动作。相量差动保护综合利用了故障电流的相位和幅值信息进行故障判别，提高了保护的灵敏度。由于只需在端部保护之间传输幅值与相位信息，因此减少了数据传输负担，特别适用于采用数字通信通道的数字式保护。

(3) 全电流差动保护。以被保护线路端部故障电流的全电流（瞬时电流）差为故障量的电流差动保护。保护依据的故障特征为：区外故障时，本端故障电流与其余各端故障电流的全电流差值等于零；区内故障时，本端故障电流与其余各端故障电流的全电流差值等于故障电流值。考虑电流互感器测量误差等因素引起的不平衡电流，实际保护采用的判据为：当全电流差值大于门槛值时，判断为发生了区内故障，保护动作；否则，判断为发生了区外故障，保护不动作。全电流差动保护利用瞬时故障电流信息，提高了反应轻微故障和高阻接地故障的灵敏度。由于需要在线路端部保护之间传输全电流，全电流差动保护一般用于采用导引线通道的双端线路保护。

方向比较保护　比较被保护线路端部故障电流方向的纵联保护。保护判据为：故障区段的端部故障电流方向相同（以保护安装处指向线路的方向为正向），而非故障区段端部故障电流方向相反。如图2所示的闭环运行的配电环网中，F点故障时，故障线路两端测量得到的故障电流 i_{12}、i_{21} 方向相同，保护动作跳开QF12和QF21，实现故障隔离；故障区段之外，如QF21和QF42处的保护测量得到的电流方向相反，保护不动作。故障电流的方向根据其与测量电压的相位关系确定，因此需要安装三相电压互感器。

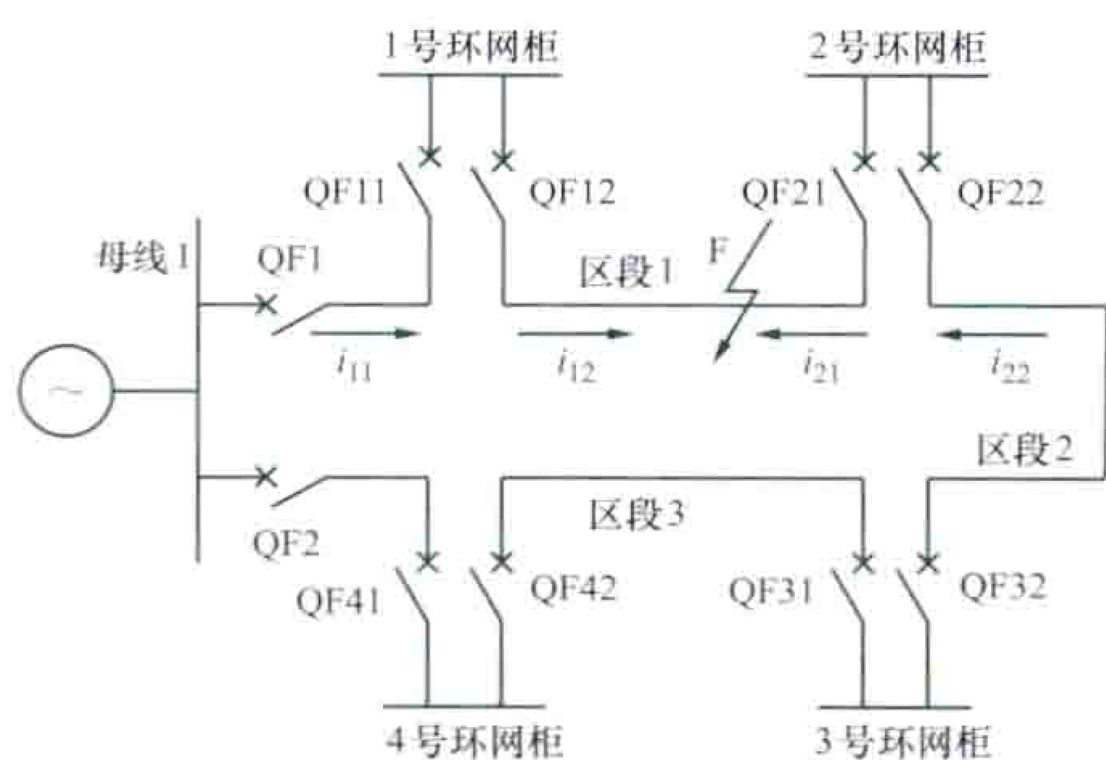


图2　闭环运行的配电环网故障电流方向示意图

展望　随着配电线路闭环运行方式的出现和分布式电源的接入，使得配电线路故障电流双向流动，采用纵联保护可以解决传统配电线路电流保护难以保证动作的快速性与选择性的问题，因此，配电线路纵联保护技术将在未来配电网中大量应用。此外，传统的纵联保护都是采用专用保护装置和专用通道，考虑到解决“自动化孤岛”问题与降低投资的需要，未来配电线路纵联保护需要与配电网自动化系统终端共用软硬件与通信资源。

peidianzhansuo zhongduan

配电站所终端　(distribution substation terminal unit, DSTU)　对中压配电网中开闭所、配电所（室）、箱式变电站进行监控的配电网自动化系统终端的总称，简称站所终端。开闭所终端主要完成开闭所内中压进、出线以及母联开关的监测、保护与控制；配电所（室）、箱式变电站终端除完成中压线路的监测与保护控制外，还要根据设计要求对配电变压器、无功补偿设备以及低压出线进行监测与控制。此外，还需要转发站所内直流电源监视装置等其他智能设备的数据。

站所终端外部输入电源通常取自站所内的交流220V自用电源，在自用电源中断时，使用站所内交流不间断电源（UPS）提供备用电源。对于不具备不间断电源的站所，通常配备14～24A・h铅酸免维护蓄电池作为后备电源，以满足自用电源中断时的供电需要。



图1　配电站所终端（分布式结构）

站所终端通常有分布式与集中式两种结构形式见图1和图2。①分布式结构面向站所间隔的一次设备配置，各间隔的终端之间通过现场通信总线（CAN或LonWorks）级联组网，选择其中一个间隔的终端作为主终端与配电网自动化系统主站通信，转发其他终端的数据。通常采用分散安装的方式，即将间隔终端安装到每一个一次设备（开关柜）内；也可采用集中组屏的方式，将所有的间隔终端安装在一个屏柜里。②集中式结构采用插箱式结构测控单元集



图2　配电站所终端（集中式结构）

中组屏，通过二次电缆与各间隔设备内的电压、电流互感器、操作控制回路连接。

见配电网自动化系统终端。

peidian zidonghua

配电自动化 (distribution automation) 利用现代计算机与通信技术，将中、低压配电网的实时运行、电网结构、设备、用户以及地理图形等信息集成，实现其运行监控及管理自动化与信息化的技术。配电自动化是提高中、低压配电网供电质量、运行效率和分布式电源接纳能力，改进客户服务水平的重要技术手段。社会经济的发展与分布式电源的大量接入，给配电网调度、控制与管理水平提出了更高的要求，配电自动化技术受到了广泛关注。

功能 包括配电网运行自动化功能和配电网管理自动化功能两个方面。

配电网运行自动化功能主要包括数据采集与监控、自动故障定位/隔离与恢复供电、电压与无功控制、负荷管理等运行控制功能。（见配电网自动化系统）

配电网管理自动化功能主要包括配电网设备管理、停电管理、检修管理、缺陷管理、作业（工作票、操作票）管理、规划设计管理等诸项管理功能。

作用 包括提高供电可靠性、配电网容量利用率、电能质量、用户服务质量、管理效率以及降低线损等方面。

提高供电可靠性 减少停电次数与停电时间，能够减少用户的停电损失，从而带来巨大的经济效益，是配电自动化的首要作用。提高供电可靠性的作用主要体现在降低故障发生几率、减少故障停电时间、缩短故障修复时间、缩短倒闸操作停电时间等方面。

提高配电网容量利用率 扩大现有配电网的供电能力，减少或延缓配电网建设投资。配电自动化为在不同的变电站、馈线之间及时地转供负荷创造了条件，从而可以在不影响供电可靠性的情况下，压缩备用容量，减少一次设备的投资。

提高电能质量 实时监视配电线路供电电压的变化以及谐波含量等，使运行人员能够及时发现电能质量问题，通过调整运行方式、调节变压器分接头挡位、投切无功补偿电容器组等措施，保证电能质量合格。

降低损耗 优化无功分布，实现无功功率就地平衡，减少线损。为运行人员提供监视并调整配电变压器、馈线负荷水平的技术手段，使其能够合理地分配负荷，避免设备因过载或负载过小增加损耗。

提高用户服务质量 在停电故障发生后，能够及时确定故障点位置、故障原因、停电范围及大致恢复供电时间，给用户一个满意的答复。由计算机制定抢修方案，尽快修复故障，恢复供电，进一步增加用户满意度。

提高管理效率 对配电网进行远程实时监视与控制，可节约大量的人工现场巡查故障与倒闸操作劳动力；同时，生产管理实现自动化、信息化，可以很方便地录入、获取各种数据，通过计算机系统提供的软件工具进行分析、决策，制作各种表格、通知单、报告，将人们从繁重的工作中解放出来，提高了工作效率与质量。

配电自动化系统 完成单一或综合的配电自动化功能的自动化系统的总称，包括配电网运行自动化系统、配电网管理自动化系统以及由这两个系统集成的配电管理系统。

配电网运行自动化系统 完成配电网运行自动化功能的自动化系统，简称配电网自动化系统（distribution network automation system，DNAS)。可将配电网自动化系统分为配电网数据采集与监控系统（DSCADA 系统）与配电网运行自动化高级应用软件两部分。DSCADA 系统是配电网自动化系统的基础子系统，它服务于配电网调度与控制，完成配电网实时数据采集与运行监控功能；高级应用软件包括故障信息管理、馈线自动化（故障定位、隔离与恢复供电）、网络拓扑、合环操作、状态估计等。

实际工程中，将配电网运行自动化系统简称为配网自动化系统或配电自动化系统（DAS)。

配电网管理自动化系统 完成配电网管理自动化功能的自动化系统，通常称为配电生产管理系统（distribution product management system，DPMS)。DPMS 一般是以自动绘图/设备管理/地理信息系统（AM/FM/GIS）作为基础支撑平台开发的，因此，可把配电网生产管理自动化看作 AM/FM/GIS 的高级应用。AM/FM/GIS 利用通用 GIS 平台对配电设备和线路，按地理坐标或空间位置进行各种处理与管理。有的供电企业把配电 GIS、DPMS 作为两个相对独立的系统开发，这种情况下，DPMS 需要与配电 GIS 通信以获取配电设备和线路的属性数据、网络拓扑与地理背景信息。

配电管理系统 (distribution management system，DMS)，完成配电网运行与管理自动化功能的计算机系统，又称配电网综合自动化系统。（见配电管理系统）

配电自动化系统规划 编制配电自动化系统发展计划的管理活动。编制步骤和主要内容：①根据城市供电区域类别及其对供电可靠性的要求与配电网基础条件，确定规划范围和规划内容。②收集相关资料作为规划依据。包括城市配电网一次系统和二次系统规划资料，配电网规模、接线方式、开关设备配置、负荷转供能力与故障处理时间等资料，调度自动化系统现状与规划资料，配电网通信现状和规划资料，自动化设备及系统工程综合造价等资料，企业技术经济指标资料（如新增网售电量、近 3 年和 5 年的总投资、投资收益率、配电成本等)。③分析配电网现状，根据其对供电可靠性的要求，确定不同类别的供电区域的规划建设目标。④制定规划原则和技术方案，包括监控选点、系统体系结构、系统集成方案、配电网自动化系统主站、配电网自动化系统子站、配电网自动化系统终端、配电网自动化通信系统、馈线自动化、一次设备改造及工程管理等内容。⑤制定分阶段建设与改造方案。⑥进行规划投资估算和规划方案评估。⑦编制规划报告，提交相关部门审查。

实施条件 供电企业能否实施配电自动化，取决于外部需求条件与内部基础条件两个方面。

外部需求条件 根据地区社会经济发展水平、国内外配电自动化建设经验，以及用户对供电可靠性的要求，对是否有必要建设配电自动化做出定性判断：如果一个地区的经济发展水平较高，用户对供电可靠性的要求也比较高，配电自动化投资的回报就高，应把配电自动化建设提到议事日程上。另一个要考虑的因素是负荷密度，负荷密度越高，说明社会经济发展水平越高，配电线路停电引起的停电损失就越大，实施配电自动化的效益也就越明显。

内部基础条件　审查配电网网架结构、一次设备以及运行管理水平是否满足实施配电自动化的要求。①一次网架结构与容量设计是否合理。应采用环网、多供一备等结构形式且馈线要具有足够电源备用容量，馈线一旦发生故障，能将受影响的负荷转供到非故障线路区段上去，达到“$N-1$”的供电可靠性效果，否则即便实施了配电自动化，也达不到应有的效果。一次网架结构应相对稳定，在未来不会有很大的变化，否则配电网自动化系统终端、配电网自动化系统子站、配电网自动化通信系统的重新部署以及配电网自动化系统主站配置数据更新的工作量大，造成较大的投资浪费。②一次设备是否具备实施配电自动化的条件。馈线分段开关要能够进行电动操作，并且能够安装电压互感器、电流互感器，满足配电网自动化系统终端供电与测量要求；此外还要有足够的空间安装二次测控设备。③供电可靠率的水平。供电可靠率是一个地区网架结构、运行管理水平的反映，因此，可以根据其实际达到的供电可靠率水平，判断该地区是否具备实施配电自动化的内部基础。一般认为，如果一个地区的供电可靠率超过99.95%（用户年平均停电时间4.3h），说明该地区网架结构、技术装备基础比较好，配电网运行管理水平相对较高，可以考虑实施配电自动化。

发展历程　20世纪50年代初期，英国、日本、美国等开始使用时限顺序送电装置自动隔离故障区间，加快查找馈线故障地点。七八十年代，国内外都应用电子及自动控制技术，开发出智能化自动重合器、自动分段器及故障指示器，实现故障点自动隔离及非故障线路恢复供电的简易型馈线自动化功能。80年代，随着计算机及通信技术的发展，形成了包括远程监控、故障自动隔离及恢复供电、电压调控、负荷管理等实时功能在内的配电自动化技术。1988年美国电气电子工程师协会（IEEE）编辑出版了《配电自动化》教程，标志着配电自动化技术已发展成为一项独立的电力自动化技术。90年代开始，地理信息系统（GIS）技术有了很大发展，开始应用于配电网的管理，形成了离线的自动绘图/设备管理（AM/FM）系统、停电管理系统等，并逐步解决了管理的离线信息与实时监控信息的集成问题。21世纪，分布式电源大量接入，使配电网的潮流与故障电流双向流动，给配电网的运行控制与管理提出了新的挑战。高级配电自动化（advanced distribution automation，ADA）的概念最早由美国电科院（EPRI）在其“智能电网体系”研究报告中提出。高级配电自动化实现配电网的全面控制与自动化并对分布式电源进行集成，使配电网的性能得到优化。

中国配电自动化的发展始于20世纪80年代末，当时石家庄与南通两地引进日本的重合器、分段器进行顺序动作型馈线自动化试点。到2003年底，全国100多个城市建设了配电网自动化系统，其中绍兴、厦门、北京、青岛、济南、杭州、银川等地的系统相对比较成功。

用户对供电质量要求的不断提高以及智能电网的兴起，极大地助推了配电自动化的发展。中国南方电网有限责任公司2008年启动了广州、深圳两个城市的配电自动化试点工作，之后启动了南宁、东莞等13个主要城市的配电自动化建设工作。国家电网公司2009年开始了在北京、杭州、厦门、银川4个城市的配电自动化试点工作，之后又分2批启动了25个城市的配电自动化建设工程。配电自动化工程在提高配电网供电可靠性与运行效率方面发挥了很好的作用。

分布式电源的大量接入，使配电网成为一个正常运行功率与故障电流双向流动的复杂有源配电网络，配电自动化技术面临重要的机遇与挑战。高级配电自动化满足有源配电网运行监控与自动化的需要，是未来配电自动化技术的发展方向。

peidian zidonghua xitong jicheng

配电自动化系统集成　（integration of distribution automation systems）　通过应用系统间的信息传输与服务，实现配电网自动化各系统以及相关业务系统之间的信息共享的技术。配电自动化信息涉及面广，不仅有相当多的实时信息，还有非实时和准实时信息需要从其他应用系统中去获取。为了规范应用系统间的集成和接口，国际电工委员会制定了IEC 61968系列标准，运用集成总线将若干相对独立的应用系统/模块进行整合，实现信息交换，整合若干“信息孤岛”，形成综合应用效应。

基本内容　包括配电网自动化系统与配电地理信息系统（配电GIS）/配电生产管理系统（DPMS）以及与上一级调度自动化系统（EMS）之间的信息集成，配电网自动化系统、配电GIS/ DPMS与营销管理信息系统［包括客户信息系统（CIS）、负荷管理（LM）系统、自动读表（AMR）系统、用户电话呼叫管理（TCM）系统等］之间的信息集成。各系统之间信息交换如图1所示。

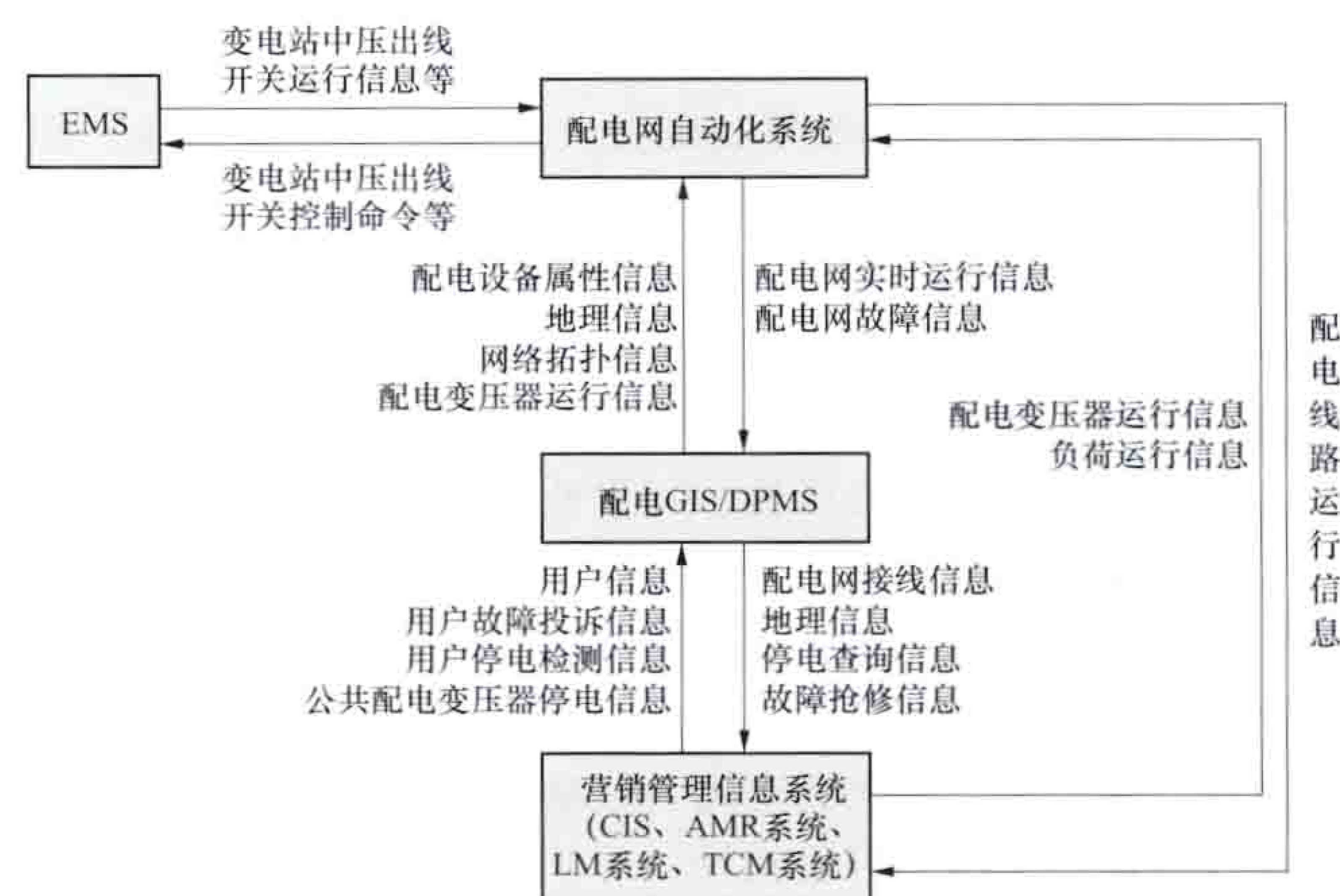


图1　配电自动化系统集成信息交换关系

（1）配电网自动化系统与EMS之间的信息集成。配电网自动化系统需要从EMS获得变电站中压开关测量与保护等信息，并且能够通过EMS下发对变电站出口开关的遥控指令，以实现馈线自动化功能。

（2）配电网自动化系统与配电GIS/DPMS之间的信息集成。为保证数据源的唯一、防止重复录入，配电网自动化系统需要从配电GIS获取配电设备属性、配电网拓扑数据、配电设备地理背景与空间信息；DPMS需要从配电网自动化系统获取配电网实时运行数据与故障信息，以更好地完成配电网管理功能。

（3）配电网自动化系统与营销管理信息系统之间的信息集成。配电网自动化系统从负荷管理系统获取配电变压器与大用户的负荷运行信息，以实现对配电网的全景实时监控。

负荷管理系统需要从配电网自动化系统获取中压配电线路运行信息，以完成线损分析等功能。

（4）配电 GIS/DPMS 与营销管理信息系统之间的信息交换关系。DPMS 部分应用功能需要营销管理信息系统的信息，而营销管理信息系统也需要从配电 GIS/DPMS 获取反应配电网接线、运行状态、停电信息与故障处理进程的信息。①配电 GIS 需要从客户信息系统获取用户及其在配电网中的位置信息，以对用户的负荷信息、停电信息进行管理；客户信息系统需要从配电 GIS 获取配电网接线与地理信息，以实现以地理图形为背景的客户信息管理。②DPMS 需要从负荷管理系统、自动读表系统获取配电变压器与用户停电信息，从用户电话呼叫管理系统获取用户停电投诉信息，以评估停电范围与故障点的位置；用户电话呼叫管理系统需要从 DPMS 获取故障原因、故障范围、预计停电时间、停电抢修进展等信息，以回答用户停电查询。

基本原则　包括：①信息集成遵循标准构架和接口方式，采用面向服务架构（SOA），在实现各系统之间信息交换的基础上，对跨系统业务流程的综合应用提供服务和支持。②配电网自动化系统和相关应用系统在信息交互时宜采用设备命名和模型规范，确保各应用系统对同一个对象描述的一致性。电气图形、拓扑模型的来源和维护应保证源端唯一性。③信息集成应满足电力二次系统安全防护规定，采取安全隔离措施，确保参与信息集成的各系统及其信息的安全性。④宜采用信息交互总线实现穿越信息安全物理隔离装置和消息适配功能。

信息交互总线　在配电网自动化系统、配电 GIS/DPMS、EMS、营销管理信息系统等基础上，实现数据自动同步、配电数据管理的流程化、信息化和应用集成。按照 IEC 61968 标准的总线机制进行设计，采用面向服务的架构和粗粒度的消息机制，实现各个系统之间的松耦合。各系统之间不直接连接，需要连接到信息交互总线上与其他系统进行信息交互，保证信息交互的灵活性、可靠性、安全性。

信息交互总线保证在一个异构的环境中实现信息稳定、可靠地传输，屏蔽掉实际中的硬件层、操作系统层、网络层等相对复杂、烦琐的界面，为用户提供一个统一、标准的信息通道，保证用户的逻辑应用与这些底层平台无关，最大限度地提高用户应用的可移植性、可扩充性和可靠性。最重要的是它提供一个基于应用、交换的先进应用整合理念，最大限度地减少应用系统互联所面临的复杂性，保证每一个应用系统的更新和修改都能够实时地实现，真正体现了应用整合的精髓，当新的应用系统出现时能够简便地纳入到整个环境当中。

安全防护措施　电力二次（自动化）系统的网络安全防护应坚持安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证的原则，将配电网自动化系统、EMS、自动读表系统、负荷管理系统部署在生产控制大区，配电 GIS/DPMS、客户信息系统、用户电话呼叫管理系统在管理信息大区，如图 2 所示。由于不同的自动化应用系统部署在不同的安全区，它们互相之间不可能使用同一个信息交互总线交换信息，需要采用“总线＋总线网关”的解决方案：分别在生产控制大区与管理信息大区建立信息交互总线，大区内部的自动化系统通过防火墙与信息交换总线连接，两个大区的信息交互总线之间通过具有物理安全隔离措施的网关连接。

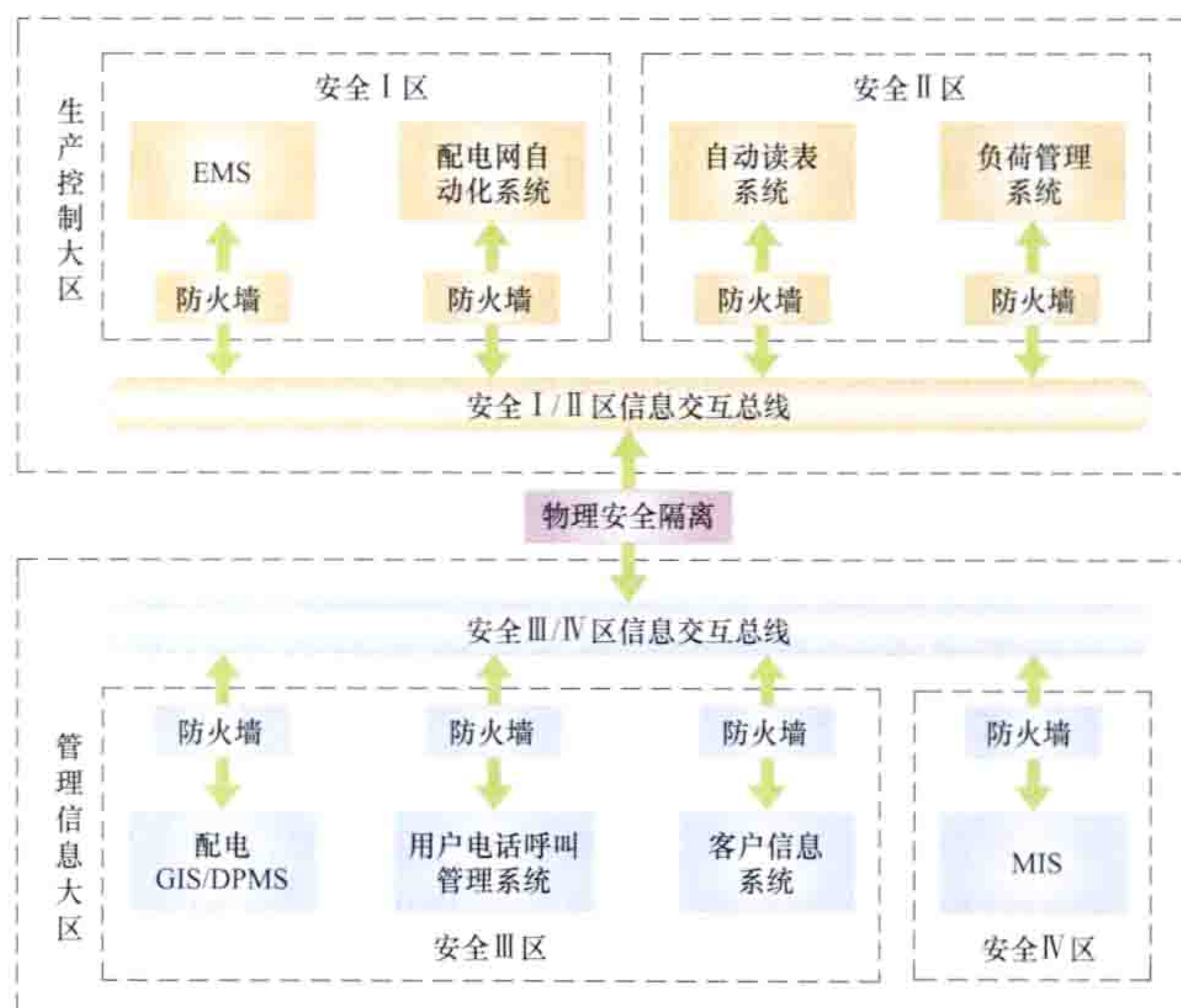


图 2　不同自动化系统间数据交换安全防护措施

发展　早期的自动化系统开放性差，信息交换接口不标准，数据模型不统一，系统之间需通过专用接口实现信息集成，如果自动化系统比较多，系统之间的连接将变得十分复杂，造成信息集成困难、管理复杂，形成一个个“信息孤岛”。2000 年以后，为了规范应用系统间的信息集成，国际电工委员会制定了 IEC 61968 系列标准，提出运用信息交互总线，为各种应用系统之间的有效集成提供解决方案，是配电自动化系统集成的发展趋势。

pinlü piancha

频率偏差　（frequency deviation）　电力系统频率的实际值与额定值之差。电力系统频率是电能质量的基础指标之一，是全电力系统一致的运行参数。电力系统的额定频率在中国大陆（包括港、澳地区）及欧洲均采用 50Hz，北美及中国台湾地区多采用 60Hz，日本则有 50Hz 和 60Hz 两种。引起电力系统频率偏差的主要原因是负荷的波动，任何一处负荷的变化，都会引起全系统功率的不平衡，导致频率的变化。电力系统运行时，要及时调节各发电机的出力，保证频率偏移在允许的范围之内。电力系统频率偏差以实际频率与额定频率之差或其差值与额定值之比的百分数表示，即

$$\Delta f = f - f_N$$

或

$$\Delta f = \frac{f - f_N}{f_N} \times 100\%$$

式中 f 为实际频率值，Hz；f_N 为额定频率值，Hz。

影响　频率偏差是发电能力与用电需求失去平衡造成的。电力系统频率偏差达到某一数值时，会引起下列后果：

（1）影响生产效率和产品质量。频率偏差将引起电动机的转速和功率变化，导致与转速有关的生产机械的生产效率、产品产量和产品质量下降，甚至出现残次品。

（2）影响电子设备正常工作。频率偏差的积累会在电钟指示的误差中表现出来，使用于测量、控制等电子设备的准确性和工作性能受到影响，频率过低时甚至无法工作；影响电能表计量计数、通信和广播传送质量；造成自动远动装置误动作。

（3）影响电力系统安全运行。系统频率下降时，会引起：①汽轮机叶片的振动变大，影响使用寿命，甚至产生裂

纹而断裂。②由电动机驱动的机械（如风机、水泵及磨煤机等）的出力降低，导致发电机出力下降，使系统的频率进一步下降；当频率降到46Hz以下时，可能在几分钟内使火电厂的正常运行受到破坏，系统功率缺额更大，频率下降更快，从而发生频率崩溃现象。③异步电动机和变压器的励磁电流增加，所消耗的无功功率增大，引起电压下降。当频率下降到45～46Hz时，各发电机及励磁的转速均显著下降，致使各发电机的电动势下降，全系统的电压水平大为降低，可能出现电压崩溃现象。④降低了电力系统应对事故的能力，一旦遇到系统大的功率波动，有可能导致系统稳定破坏。⑤电容器的无功出力成比例降低，使电容器对电压的支持作用受到削弱，不利于系统电压的调整。当系统频率过高时，会引起：①系统频率不超出正常允许上限值时，对运行设备有积累损伤，增加运行损耗，降低效率和产品质量；②系统频率超出正常允许上限值时，使得电源（机组）失去大量的负荷而超速运转，导致机组损坏、系统瓦解、电厂全停的重大恶性事故。

标准　电力系统频率偏差的规定包括电源和负荷两个方面。电源方面是对电力系统电源供应负荷的频率质量做出的规定，包括额定值、正常运行允许偏差范围、事故方式下允许的上限值和下限值、事故方式下频率异常程度及其相应的容许时限。负荷方面是对消耗电能的设备在运行过程中能承受的频率偏差做出的用电设备质量规定。两方面对频率允许偏差的要求不一致，电源方面要求严，负荷方面是对用电设备适应能力的要求，允许偏差范围偏宽。各国电力系统频率正常允许偏差范围不尽相同，相互间差别约为0.2个百分点。

在中国，GB/T 15945—2008《电能质量　电力系统频率偏差》第3.1条规定“电力系统正常频率偏差允许值为±0.2Hz，当系统容量较小时，偏差值可以放宽到±0.5Hz”；第3.2条规定“用户冲击负荷引起的系统频率变动一般不得超过±0.2Hz，根据冲击负荷性质和大小以系统的条件也可适当变动限值，但应保证近区电力网、发电机组和用户的安全、稳定运行以及正常供电”。根据1996年电力工业部颁发的《供电营业规则》第五十三条规定，在电力系统正常情况下，供电频率允许偏差：①电网装机容量在300万kW及以上为±0.2Hz；②电网装机容量在300万kW以下的为±0.5Hz；③在电力系统非正常状况下，供电频率允许偏差不超过±1.0Hz。

国外电力系统频率允许偏差值的规定见表。

国外电力系统频率允许偏差值的规定

<table>
<tr><th rowspan="2">国家</th><th rowspan="2">电力公司或
电力系统名称</th><th rowspan="2">额定频率
f_N(Hz)</th><th colspan="2">正常运行</th><th colspan="2">事故方式</th></tr>
<tr><th>Δf(Hz)</th><th>Δf(%)</th><th>Δf(Hz)</th><th>Δf(%)</th></tr>
<tr><td>美国</td><td>北美系统</td><td>60</td><td>±0.1</td><td>±0.17</td><td rowspan="5">1.0～
+0.5</td><td rowspan="5">−2.0～
+1.0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">日本</td><td>50Hz电力系统</td><td>50</td><td>±0.1</td><td>±0.2</td></tr>
<tr><td>60Hz电力系统</td><td>60</td><td>±0.1</td><td>±0.17</td></tr>
<tr><td>加拿大</td><td>全国</td><td>60</td><td>±0.1</td><td>±0.17</td></tr>
<tr><td>英国</td><td>中央发电局</td><td>50</td><td>±0.2</td><td>±0.4</td></tr>
<tr><td>法国</td><td>法国电力公司</td><td>50</td><td>±0.1</td><td>±0.2</td><td rowspan="3">±0.5</td><td rowspan="3">±1.0</td></tr>
<tr><td>意大利</td><td>全国</td><td>50</td><td>±0.1</td><td>±0.2</td></tr>
<tr><td>瑞典</td><td>全国</td><td>50</td><td>±0.1</td><td>±0.2</td></tr>
<tr><td>芬兰</td><td>全国</td><td>50</td><td>±0.2</td><td>±0.4</td><td>−2.5</td><td>−5.0</td></tr>
<tr><td>荷兰</td><td>全国</td><td>50</td><td>−0.2～
+0.1</td><td>−0.4～
+0.2</td><td>−2.5</td><td>−5.0</td></tr>
<tr><td>比利时</td><td>全国</td><td>50</td><td>−0.2～
+0.1</td><td>−0.4～
+0.2</td><td>−1.0</td><td>−2.0</td></tr>
<tr><td>德国</td><td>全国</td><td>50</td><td>±0.03</td><td>±0.06</td><td>−0.5</td><td>−1.0</td></tr>
</table>

注：2000年8月欧盟输电协调联盟（The Union for the Coordination of Transmission of Electricity，UCTE）统一了当时欧盟中比利时、奥地利、西班牙、葡萄牙、意大利、瑞士、德国、荷兰、法国、希腊、斯洛文尼亚、南斯拉夫、克罗地亚、卢森堡、波斯尼亚-黑塞、马其顿16国的频率偏差标准。内容为：正常运行小于0.05Hz，事故方式为0.05～0.15Hz，严重事故方式为0.15Hz以上。

改善措施　电力系统中防止频率异常的主要措施有：①增加电力系统的发电能力以及改善调频手段；②保持足够的系统备用容量；③调整电力负荷，并备有事故拉闸序位表；④在系统内安装按频率降低自动减负荷装置，在可能被解列而功率过剩的地区装设按频率升高切除发电机等装置；⑤合理选用水电厂的备用调频容量；⑥改善无功功率平衡，抑制电压波动。



qidongqi

起动器 (starter) 控制电动机起动与停止或正反转用的、可带有过载保护的开关电器（见低压电器）。起动器用于控制低压直流电动机与交流电动机起动、停止或反转，它可带有过载继电器或脱扣器以保护电动机的过载，有的同时还带有欠电压和其他保护。

起动器（见图）按灭弧介质可分为空气式和油浸式；按操作方法可分为手动操作、电磁操作、电动操作、气动操作等。常见的起动器有电磁起动器、星-三角起动器、自耦减压起动器、频敏起动器、综合起动器和软起动器等。



起动器

电磁起动器 由电磁接触器、热继电器、外壳等组成，具有过载和失电压保护功能。电磁起动器又分为不可逆电磁起动器和可逆电磁起动器。不可逆电磁起动器由一台交流接触器和热继电器等组成，用外接（或内附）按钮控制电动机向一个方向转动的起动与停止；可逆电磁起动器由两台交流接触器和热继电器等组成，其中一台接触器操作电动机正转，另一台操作反转，两台接触器之间加以电气联锁与机械联锁，防止两台接触器同时通电造成电源短路。以上两种电磁起动器属于直接全压起动，适用于起动容量在几十千瓦以下的交流笼型异步电动机。容量较大的电动机采用电磁起动器起动时电流较大，会引起低压配电线路电压的降低，电压降低后电动机起动转矩减小，使起动困难，同时又会影响同一供电线路上其他电气设备的正常运行。

星-三角起动器 由交流接触器、热继电器、时间继电器、外壳等组成。起动时先将电动机绕组接成星形，每相绕组的供电电压为相电压（相电压为线电压的 $1/\sqrt{3}=0.57$ 倍），降低起动电压以减小起动电流的冲击，经过一定时间待电动机转速升高到一定值后，再将电动机绕组的接法改接成三角形，这时每相绕组的供电电压为线电压，完成起动。这种起动方式较为简单，属于降压起动，能满足一般轻负载电动机的起动要求。星-三角起动器不宜用于起动重负载机械设备（如球磨机等）的电动机。

自耦减压起动器 又称起动补偿器。它由交流接触器、热继电器、自耦变压器等组成。通过从自耦变压器上抽出一个或若干个抽头，以降低感应电动机起动时的端电压，从而减小起动电流。它适用于起动几十千瓦至数百千瓦较大容量的电动机。其工作原理是起动时先将电动机绕组接至自耦变压器的抽头上，其电压为额定电压的 60%～80%，经过一定时间后自动（用时间继电器）或手动将电动机绕组转换为全电压供电，提高了起动电压，增大了起动转矩，同时也减小了起动电流的冲击。由于利用自耦变压器多抽头减压，故可适用于起动各种负载的电动机，其电压降低程度小于星-三角起动器，可获得与星-三角起动器相比更大的转矩。

频敏起动器 由频敏变阻器和其他控制电器组成，主要用于交流绕线型大中容量异步电动机的起动。频敏变阻器是一种等效阻抗与频率有关的变阻器。其线圈绕在用厚铁板（片）叠成的铁芯上，频率高时铁芯损耗大，相应的阻抗值也大；频率低时相应的阻抗值也小。将频敏变阻器接入交流绕线型电动机的转子绕组回路，电动机起动过程中，转子的速度从零逐步增加，在转子绕组上所感应的电动势的频率由工频（50Hz）逐渐降低至很低的转差频率。随频率的变化，频敏变阻器的阻抗值由大逐渐自动减小，以满足起动过程的要求。起动结束后，频敏变阻器的阻抗值很小，仍可接在转子绕组回路中。

综合起动器 由接触器、熔断器、过载保护元件、指示灯、外壳、按钮等组成，用于远距离控制交流三相笼型感应电动机的起动和停止，同时具有过载、短路、失电压保护和信号指示功能。综合起动器一般带有薄钢板压制的外壳，若再配上橡胶板压制的外壳及橡胶封环，还可在露天或多尘的场合使用。为了适应电动机逆转的需要，这种起动器也可制成可逆式。

软起动器 由串接于电源与被控电动机之间的三相反并联晶闸管及其电子控制电路等组成，是一种集电动机软起动、软停车、轻载节能和多种保护功能于一体的新颖电机控制装置。运用不同的方法控制三相反并联晶闸管的导通角，使被控电动机的输入电压按不同的要求变化，实现不同的功能。起动方式有斜坡升压软起动、斜坡恒流软起动、阶跃起动、脉冲冲击起动、电压双斜坡起动、限流起动及突跳起动等。

qizhongji diankong xitong

起重机电控系统 (electric drive control system for crane) 用于实现起重机正常运转的电力拖动及控制等电路组合的整体。起重机广泛使用在起重、运输、装卸和安装等作业中。它是实现机械化和自动化生产不可缺少的物料搬运机械，具有反复短暂工作的特点。起重机械主要有手动起重机，桥式起重机，龙门起重机，装卸桥，门座起重机，汽车、履带及铁路起重机，塔式起重机等。

起重机一般包括起升、行走、变幅、回转等机构。①起升机构。其负载特点为：负载转矩的大小不随转速而变化，当载荷不变时为恒转矩负载；属于位势负载，在起升和下降过程中，要求电动机在四个象限工作；负载变化范围大，调速时要求硬特性。②行走机构。在无风力情况下均为阻转矩，运行中负载转矩变化大，机械惯性大。③变幅机构。负载随幅度大小、起重量的大小和运动的方向变化而变化。其

性质还与变幅机构的形式有关。④回转机构。负载特点为阻转矩且与所处位置、回转方向、风力等有关，变化范围大。

起重机电控系统应能适应起重机负载的特点，满足安全、可靠、调速范围大、点动运行、可逆运转的要求，并适应位势负载的运行特点，大车行走要求电气同步。

起重机的控制已逐步从手动发展到自动，实现程序控制、遥控、群控、数控、电子计算机控制及采用工业电视、自动称量等技术。无论采用什么控制方式，对电控系统首要要求是安全、可靠，除电气设备本身要保证安全运行外，必须有完善的故障诊断系统及故障报警和显示设备，一旦发生故障立即制动停车，防止事故扩大。

专为起重机设计的电动机，有较高的机械强度和较大的过载能力。为了减少起动、制动时的能量损耗，这类电动机电枢做得细长，以减小其转动惯量，也加快了起动、制动过渡过程，但电枢温升高于励磁绕组，需提高电枢绕组的热能品质指标。

起重机电控系统分交流传动与直流传动两大类。

交流传动电控系统　交流传动电动机可选用笼型感应电动机、双笼型感应电动机-行星联轴器（或行星减速器）、变极双速笼型感应电动机、绕线转子感应电动机等。其优点是系统简单、可靠、价格便宜，缺点是调速范围小、点动性能差、控制特性差、动态过程中能量损耗大、起制动次数受到限制，因此只在对控制要求不高的场合采用。一般来说，笼型感应电动机的容量使用范围在30kW以下，绕线转子感应电动机在200kW以下。20世纪90年代以来，由于广泛采用可关断电力电子器件实现交流电动机调速，提高了交流传动电控系统的性能。

交流传动电控系统主要有液压推杆调速、涡流制动器调速、晶闸管定子调压调速、晶闸管串级调速、晶闸管变转子阻抗调速、变频调速等电控系统。

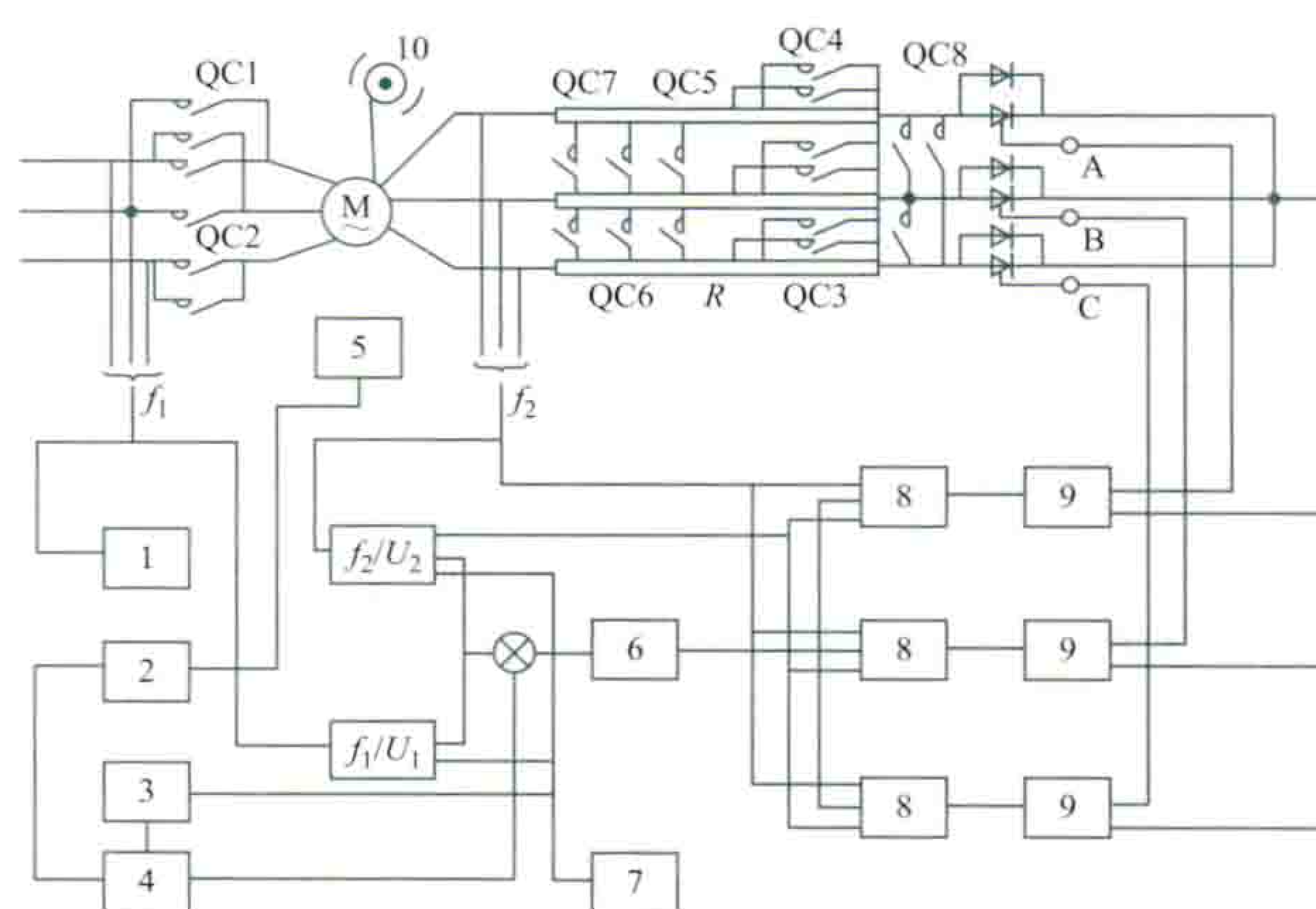
（1）液压推杆调速电控系统。这种调速电控系统简单，但只有1∶4～1∶3的调速比，调速特性硬度差，且制动器有磨损和发热，用于起升机构下降时有时有“溜钩”现象，故只适用于中小容量的电动机。如采用晶闸管或饱和电抗器对液压推杆电动机进行控制，并采用速度反馈的闭环系统，可增大调速比。

（2）涡流制动器调速电控系统。涡流制动器由与电动机同轴旋转的电枢和固定的感应器组成，依靠涡流作用产生制动转矩。其结构简单，制作方便且坚固耐用。该系统开环时调速比可为5∶1～10∶1，速度闭环时可扩大调速范围，快速下降时可得到较大的制动转矩，但低速时效率低、损耗大，故只宜用于低速持续时间较短的起重机。

（3）晶闸管定子调压调速电控系统。采用绕线转子感应电动机，在调压的同时，转子回路可外接电阻或外接频敏电阻。这种调速系统投资较少，维护方便，可靠性高，系统特性硬度为10%时，调速比可达10∶1～20∶1，可无级调速，能满足一般起重机的需要；但低速和反接制动时运行效率较差，较长期低速运转时发热严重。这种调速系统适用于中、小功率，短时低速工作和频繁起动、制动的一般起重机。

（4）晶闸管串级调速电控系统。这种调速电控系统的效率较高，电动机可较长时间低速运行，动力负载时能较长时间以超同步转速下降，但系统复杂，投资大，系统功率因数差，故只宜用于功率较大、低速时间比较长、需超同步转速下降等能充分发挥其优点的场合。

（5）晶闸管变转子阻抗调速电控系统。该调速电控系统框图如图所示。将转子分级串电阻与串晶闸管变流器相结合，能满足调速、提升、下放等工况要求。通过脉冲移相控制晶闸管变流器，改变转子有效电流，等效于连续改变转子回路外接电阻，实现电动机调速。在晶闸管调速时，QC8断开。提升时，QC4闭合，短接二段转子电阻。下降时，QC3闭合，短接一段转子电阻，电动机运行于第Ⅰ象限。重载下降时，电动机运行于第Ⅳ象限。轻载下降时，由空钩判断电路控制运行于第Ⅲ象限。如实现转速闭环控制，系统调速范围为1.5%～50%额定转速，速度变化率小于或等于1.5%，与全转子串电阻调速相比可节电10%～13%。



晶闸管变转子阻抗调速电控系统框图

1—电源；2—主令电器；3—空钩判别电路；4—给定信号变换器；5—辅助控制电路；6—放大器；7—速度继电器；8—移相器；9—形成级；10—制动器；f/U—频压变换器

（6）变频调速电控系统。采用变频器与感应电动机相连，通过对变频器输出的电压频率和电压幅值的调节，实现对感应电动机转速和转矩的精确控制（见转速控制、转矩控制）。变频调速电控系统已经成为交流传动起重机电控系统的主流。

直流传动电控系统　对于性能要求较高、调速范围大的场合，采用直流电动机传动的系统曾经占据主要位置，其控制灵活、调速范围大、低速性能好，节能效果也比较显著。起升机构采用直流电动机传动，还可按负荷的大小实现恒功率调速的功能，使电动机容量得到充分发挥。直流传动电控系统已经逐步被交流变频电控系统所取代。

由晶闸管供电的直流传动电控系统，一般采用反并联无环流线路（见晶闸管相位控制直流调速），因全部设备安装在起重机上，要求尽量减小安装尺寸。室外的起重机，交流供电电源系高压进线，通过一台高压变压器变换成动力电源，直接对晶闸管供电，整流侧不带滤波电抗器。控制系统采用可编程序控制器或微型计算机，实现自动控制。

qiti baohu dianhuhan

气体保护电弧焊　(gas shielded arc welding)　用外加气体作为电弧介质等保护电弧和焊接区的电弧焊，简称气体保护焊。与焊条电弧焊、电渣焊相比，气体保护电弧焊具有以下特点：①电弧和熔池可见性好，焊接过程容

易控制；②无熔渣或少熔渣，可节省造渣和清渣所需费用；③适用范围广，通常只要改变所用电极直径和焊接工艺参数就可用于薄板和中厚板的焊接；④便于实现机械化、自动化和各种位置的焊接；⑤用惰性保护气体时，可焊接活性金属。气体保护焊的缺点是电弧的辐射光强，焊接中应加强劳动保护。另外，在有风的场所施焊应有挡风设施。

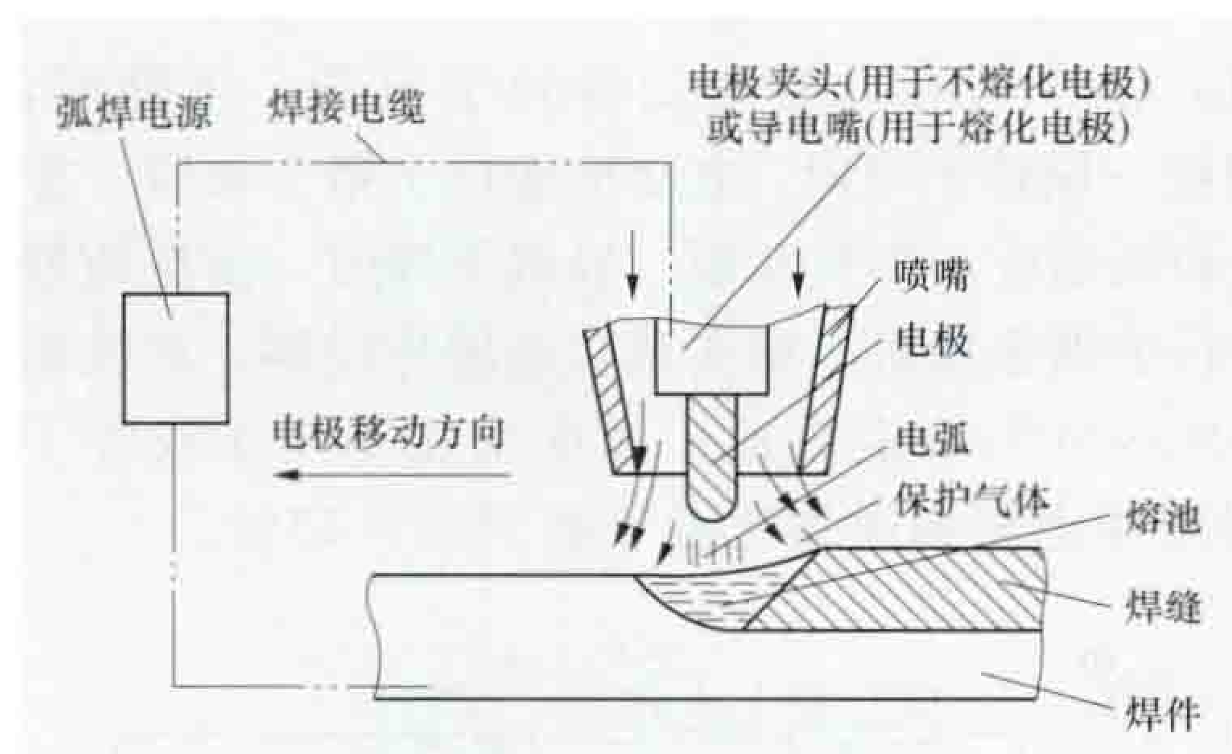
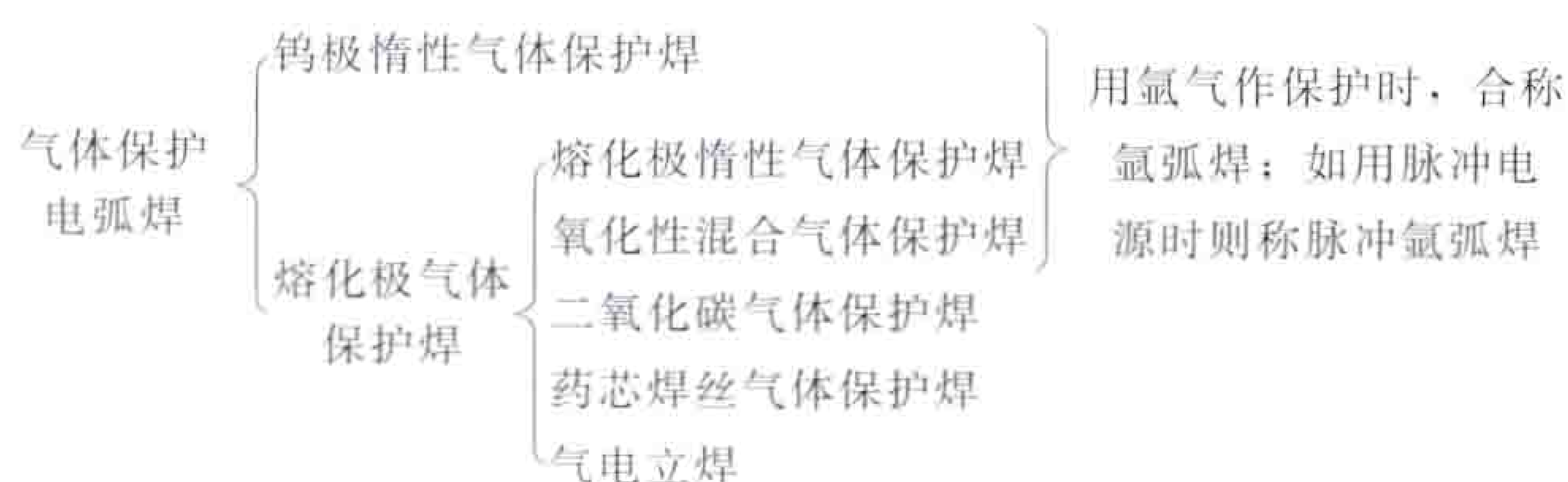


图1 气体保护电弧焊示意图

如图1所示，从喷嘴中以一定速度喷出的保护气体把电弧和焊接区与空气隔开，杜绝空气的有害作用，以获得优质焊缝。电极有不熔化电极和熔化电极两种。不熔化电极用钨极，由纯钨、钍钨或铈钨（钨中加一定量的氧化钍或氧化铈）制成。熔化电极通常做成焊丝，有许多种牌号和规格，以适应不同的焊接要求。保护气体主要分惰性气体和活性气体两大类。惰性气体主要用氩，有时用氦，虽然氦的热功率较大，但价格较贵，有时用氩与氦、氢等的混合气体。活性气体主要有二氧化碳、氩与二氧化碳和（或）氧的混合气体等。活性气体在焊接中会与金属起化学反应。不同电极和保护气体各有其适用的场合。

分类 气体保护电弧焊分钨极惰性气体保护焊和熔化极气体保护焊两大类，如下所示：



钨极惰性气体保护焊 简称TIG焊，在惰性气体的保护下利用钨电极与工件间产生的电弧热熔化母材和填充焊丝（如果使用填充焊丝）的一种焊接。用氩气作为保护气体的称钨极氩弧焊，用氦气作为保护气体的称为钨极氦弧焊。由于氦气价格昂贵，在工业上广泛使用的是钨极氩弧焊。钨极氩弧焊按操作方式分为手工焊、半自动焊和自动焊，以手工钨极氩弧焊应用最广泛，其次是自动钨极氩弧焊，半自动钨极氩弧焊则很少应用。钨极惰性气体保护焊适宜于焊接各种有色金属和合金。其特点是电弧稳定，输入能量易于控制，焊接质量高，对焊接位置和接头几何形状的适应性也较强。但因焊接电流受钨极许用电流的限制和向焊缝中添加填充金属不方便，这种方法不利于焊接厚度大的工件，焊接生产率也低。

当用脉冲电源时，如用0.5～5Hz的低频脉冲电流进行焊接，可降低焊件的热输入，便于控制焊缝冷却结晶和控制熔深，适用于薄壁构件的焊接、悬空全位置焊接和厚壁结构的打底焊接等。如用20kHz高频脉冲电流，可使电弧挺直而稳定，焊缝金属晶粒细化，并可提高焊接速度。

熔化极气体保护焊 采用可熔化的焊丝（熔化电极）与焊件之间的电弧热作为热源来熔化焊丝与母材金属，并向焊接区输送保护气体，使电弧、熔化的焊丝、熔池及附近的母材金属免受空气影响的气体保护焊。它适宜于焊接各种金属材料。与钨极惰性气体保护焊相比，焊接生产率高许多倍。用细焊丝（一般直径小于1.6mm）、小电流时，可用于各种位置的焊接；用粗焊丝、大电流时，则主要用于平焊位置。

熔化电极端部金属熔化后向熔池的过渡形式对焊接过程和焊缝形成有重要影响，熔滴过渡形式主要有喷射过渡、脉冲喷射过渡、短路过渡和滴状过渡4种。①喷射过渡。熔滴呈细小颗粒沿焊丝轴线方向快速喷射向熔池的过渡。生成条件：必须用氩（或氦）或含氩量高（＞70％）的混合气体（包括活性混合气体）作保护气体；电源用直流反接；电流必须大于其临界值（此值与焊丝直径成比例关系）。喷射过渡的特点是熔滴过渡非常稳定并有方向性，几乎无飞溅，焊缝成形好；但电弧功率大，对薄板立焊位、仰焊位的焊接较难控制。②脉冲喷射过渡。采用脉冲电弧焊电源，只在脉冲电流期间才存在喷射过渡。生成条件：除必须用脉冲弧焊电源外，其余同喷射过渡。脉冲喷射过渡的特点是除与喷射过渡相同部分外，由于电弧平均功率较小，故可用于焊接较薄的焊件，焊缝的冷却结晶和熔深等也较易控制。③短路过渡。熔滴与熔池短路接触，由于强烈过热和磁收缩效应使熔滴爆断而向熔池的过渡。生成条件：用活性气体细焊丝（直径0.5～1.6mm范围内）、小电流施焊。短路过渡的特点是能在各种位置上方便地焊接薄的焊件，但由于电弧的热功率小，焊件厚度超过6mm时会有焊缝未熔合的缺点。④滴状过渡。熔滴呈粗大颗粒向熔池的过渡。生成条件：用二氧化碳、氮或富含二氧化碳（＞80％）的混合气体作为保护气体，用粗焊丝（直径≥1.6mm）、大电流施焊。滴状过渡的特点是电弧穿透力大，焊接速度快、焊接生产率高，但焊接中金属飞溅较大。

（1）熔化极惰性气体保护焊，简称MIG焊。通常用氩、氦或氩与氦的混合气体作保护气体，熔滴过渡形式是喷射过渡或脉冲喷射过渡，适宜于焊接各种有色金属、奥氏体不锈钢和高温合金。

（2）氧化性混合气体保护焊，简称MAG焊。保护气体由惰性气体和少量氧化性气体，如O_2、CO_2或其混合气体（一般O_2为2％～5％，CO_2为5％～20％）混合而成。熔滴过渡形式为短路过渡、喷射过渡或脉冲喷射过渡，适用于碳钢、合金钢和不锈钢等黑色金属材料的焊接。

（3）二氧化碳气体保护焊，简称CO_2焊。保护气体主要用二氧化碳，有时在其中加入一定量的氧（5％～20％）。熔滴过渡形式是短路过渡或滴状兼短路过渡，只适宜于焊接碳钢和合金结构钢，焊接成本低。

（4）药芯焊丝气体保护焊。采用中心含有药芯（焊剂）的管状焊丝，用二氧化碳或二氧化碳加氩气作为保护气体，兼有二氧化碳气体保护焊和手弧焊的某些特点，适宜于焊接碳钢、低合金钢、镍及其合金等。主要特点：①由于采用二氧化碳气体和焊剂的联合保护，易于获得优质焊缝；②电弧稳定，飞溅少，焊缝成形好；③对焊件钢材成分的适应性

强；④焊接生产率高，约为手弧焊的3～5倍。

（5）气电立焊。由熔化极气体保护焊和电渣焊发展而形成的一种熔化极气体保护焊方法。保护气体采用二氧化碳气体或氩气加氧气。其主要优点是可不开坡口焊接厚板，生产率高、成本低。

焊接设备 气体保护电弧焊机主要分手工、半自动和自动焊机3类。

手工焊机只用于钨极惰性气体保护焊，由弧焊电源、焊接电缆、气瓶、气体管路和焊枪等部分组成。钨极固定在焊枪中，由人工操纵焊枪施焊。如需填充焊丝，也由人工操纵。

半自动焊机适用于熔化极气体保护焊。该焊机除具有手工焊机所需各组件外，还需要有焊丝输送机构和必要的配套件。焊丝通过焊枪中的导电嘴进入焊接区，导电嘴接于电源，焊枪由人工操纵。图2所示为一台半自动二氧化碳气体保护焊设备的组成。

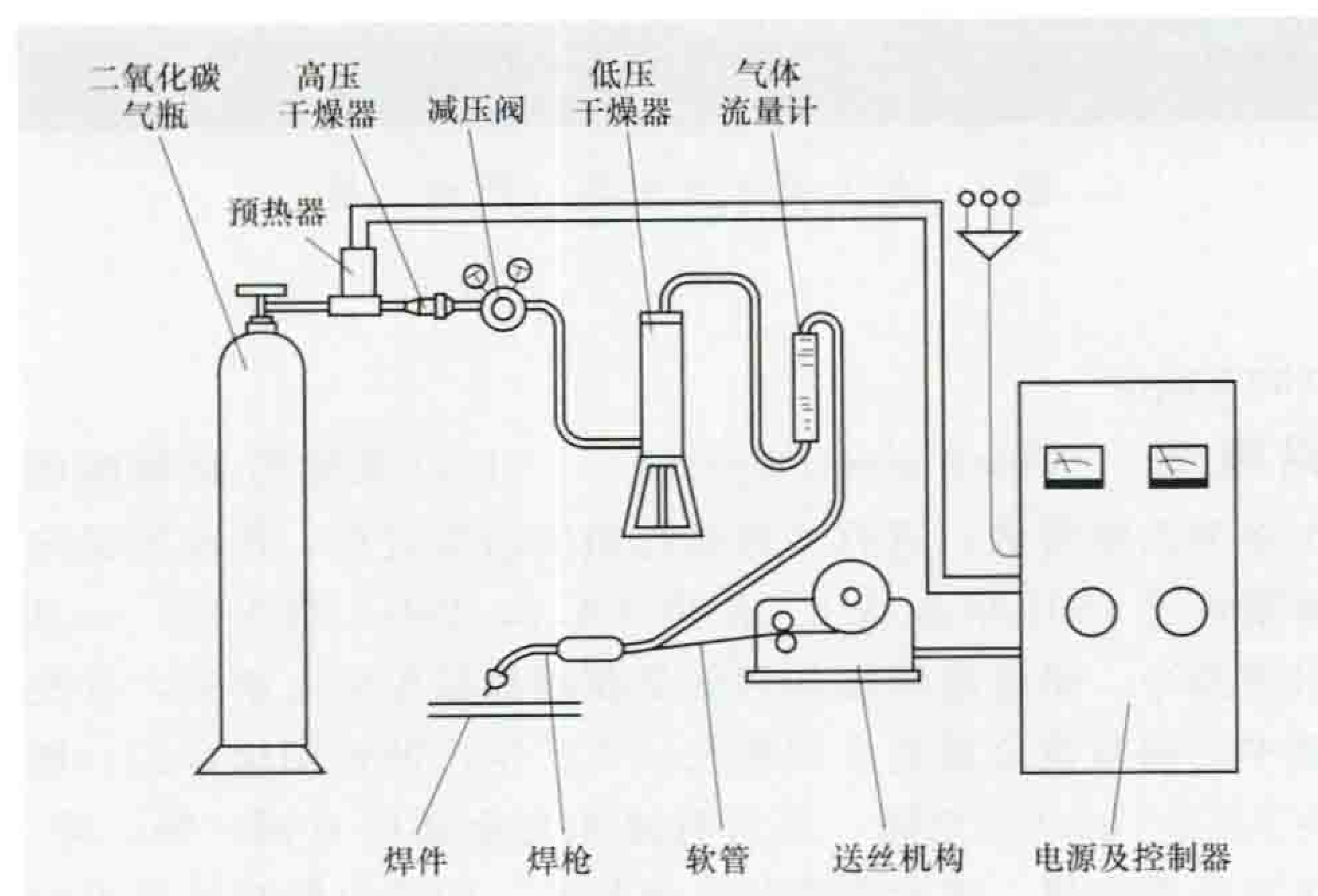


图2 半自动二氧化碳气体保护焊设备

自动焊机可用于不熔化极或熔化极气体保护焊。该焊机除具有前述组件外，还有供焊枪与焊件作相对运动的机械装置和相应的控制系统。在焊枪对准接缝并调整好电压、电流、气体流量、行程等焊接工艺参数后，焊接过程可自动进行。

历史与发展 气体保护电弧焊是在第二次世界大战期间发展起来的。在飞机制造业中，为适应铝合金、镁合金、不锈钢等焊接的需要，钨极惰性气体保护焊首先问世。其后，为克服钨极惰性气体保护焊难以焊接厚的焊件和焊接生产率低等缺点，在20世纪40年代末，对熔滴过渡形式有了一定认识以后，熔化极惰性气体保护焊进入实用阶段。1953年，苏联人B. 柳巴夫斯基等发明了二氧化碳气体保护焊，克服了惰性气体保护焊成本高的缺点，使气体保护焊在碳钢、低合金钢等普通钢材的焊接上得到推广应用。以后又出现氧化性混合气体保护焊、药芯焊丝气体保护焊、脉冲氩弧焊、气电立焊等多种气体保护焊方法。1980年，加拿大的Canada Weld Process公司研究成功TIME焊接新工艺及专用设备，大大提高了焊接生产率。随着焊接设备自动化水平的提高、新型弧焊电源的使用及电子技术、智能控制技术的广泛应用，气体保护电弧焊的焊接质量、焊接生产率及稳定性显著提高，混合气体保护焊将获得更大的发展。

qianhan

钎焊 （brazing；soldering） 利用加热使置于焊接面之间的、熔点低于被焊材料熔点的钎料熔化并保温，然后冷却结晶形成接头的方法。在低于母材（被焊材料）熔点、高于钎料熔点的温度下，利用液态钎料在母材表面润湿、铺展和在母材间隙中填缝，与母材相互溶解与扩散，实现零件间的连接。钎焊中常用钎剂（如松香、焊膏等）清洁焊件表面，使钎料容易粘连焊件，但也有不用钎剂的情况。

与熔焊比，钎焊的特点是：①焊件加热温度低，其结晶组织与机械性能变化小，变形小；②接头平整光滑；③可一次焊多个焊件或接头，生产率高；④可以焊接异种材料。钎焊接头的强度一般比母材低。

分类 钎焊按使用钎料熔点高于或低于450℃分为硬钎焊和软钎焊两类。相应的钎料分别称为硬钎料和软钎料。硬钎料主要有铜锌合金、铜磷合金、银基钎料、铝基钎料和镍基钎料等；软钎料主要有铅锡合金和锌镉合金等。

根据热源和加热方式的不同，钎焊可分为烙铁钎焊、火焰钎焊、电阻钎焊、感应钎焊、浸沾钎焊、炉中钎焊、超声波钎焊和激光钎焊等。其中除火焰钎焊和某些烙铁钎焊利用的是燃料燃烧所产生的热能外，其余各种钎焊都以电能为热源（见*电加热*）。

烙铁钎焊 使用烙铁进行加热的软钎焊。烙铁可用煤炉、木炭炉等加热，或用电加热。

火焰钎焊 使用可燃气体（氧、乙炔）火焰进行加热的钎焊。

电阻钎焊 对焊件直接通电，或将焊件放在通电的加热板上利用电阻热（见*电阻加热*）进行的钎焊。

感应钎焊 利用高频、中频或工频交流电*感应加热*所进行的钎焊。

浸沾钎焊 将焊件浸没在加热浴槽（盐浴或金属浴）中所进行的钎焊。根据所用浴槽的不同分为盐浴钎焊和金属浴钎焊两种。（见*电热浴炉*）

炉中钎焊 将装配好的焊件放在炉中加热所进行的钎焊。所用炉子主要是*电阻炉*，根据钎焊要求可用间歇式电阻炉、连续式电阻炉、自然气氛电阻炉、保护气氛电阻炉和真空电阻炉，有时也用感应加热炉。在真空炉中进行的钎焊又叫真空钎焊。

超声波钎焊 利用超声波的振动使液态钎料产生空蚀过程而破坏焊件表面的氧化膜，使钎料能更好地润湿母材的钎焊方法。

激光钎焊 采用激光束加热所进行的钎焊。将激光束聚焦在焊丝表面上加热，使焊丝受热熔化（母材未熔化）润湿母材，并填充接头间隙，从而与母材结合形成焊缝。

简史 钎焊是一种古老的焊接方法，在中国，早在春秋战国时期就已得到应用。如从曾侯乙墓中出土的建鼓，其铜座上的许多条盘龙就是分段钎焊连接而成的。经分析，所用钎料含铅58.48%、锡36.88%、铜0.23%、锌0.19%，与现代软钎料的成分相近。钎焊在机械、电子、轻工和仪器仪表等许多工业部门得到广泛应用，如用于制造铜、铝散热器，各类蜂窝状结构，刀具，波导、电真空器件和电器部件等。随着新型钎料、真空钎焊技术和精密钎焊技术的发展，钎焊技术的应用领域不断扩大，在汽轮机、燃气轮机和航空

航天器件的制造中，以及在难熔金属的焊接和金属与非金属材料的焊接中起着日益重要的作用。

qianyinwang

牵引网 （traction network） 专为电力机车或电动车组提供电力的供电回路。由于牵引负荷常处于运动之中，对于牵引网的要求除了提供足够数量符合质量标准的电能外，还应保证牵引负荷受流的稳定性。按电力机车集电方式不同，牵引网可分为架空单线式、架空复线式和第三轨式三种形式，见图1。交、直流干线电气化铁路一般均采用架空单线式；城市无轨电车则采用架空复线式，欧洲个别国家也曾采用过25Hz、6kV三相交流制，其牵引网也是架空复线式；第三轨式则普遍应用于地下铁道。按电流制式的不同，牵引网可分为直流牵引网和交流牵引网。

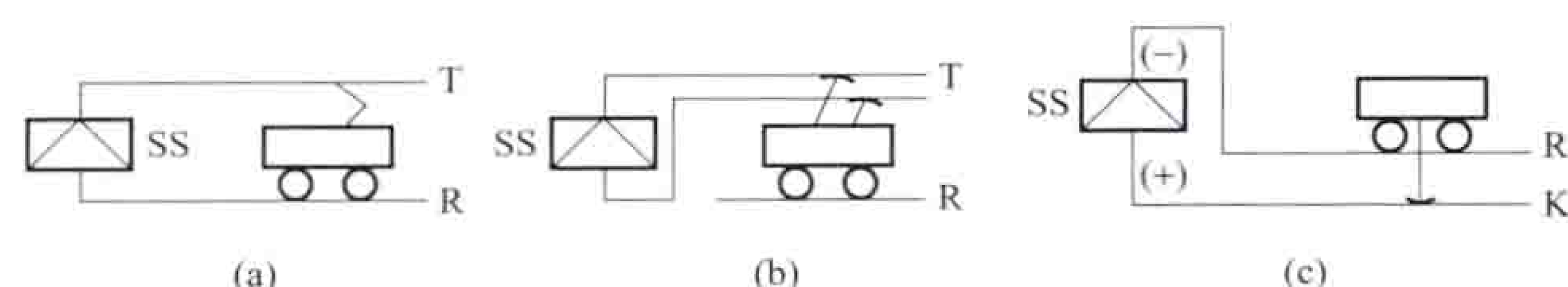
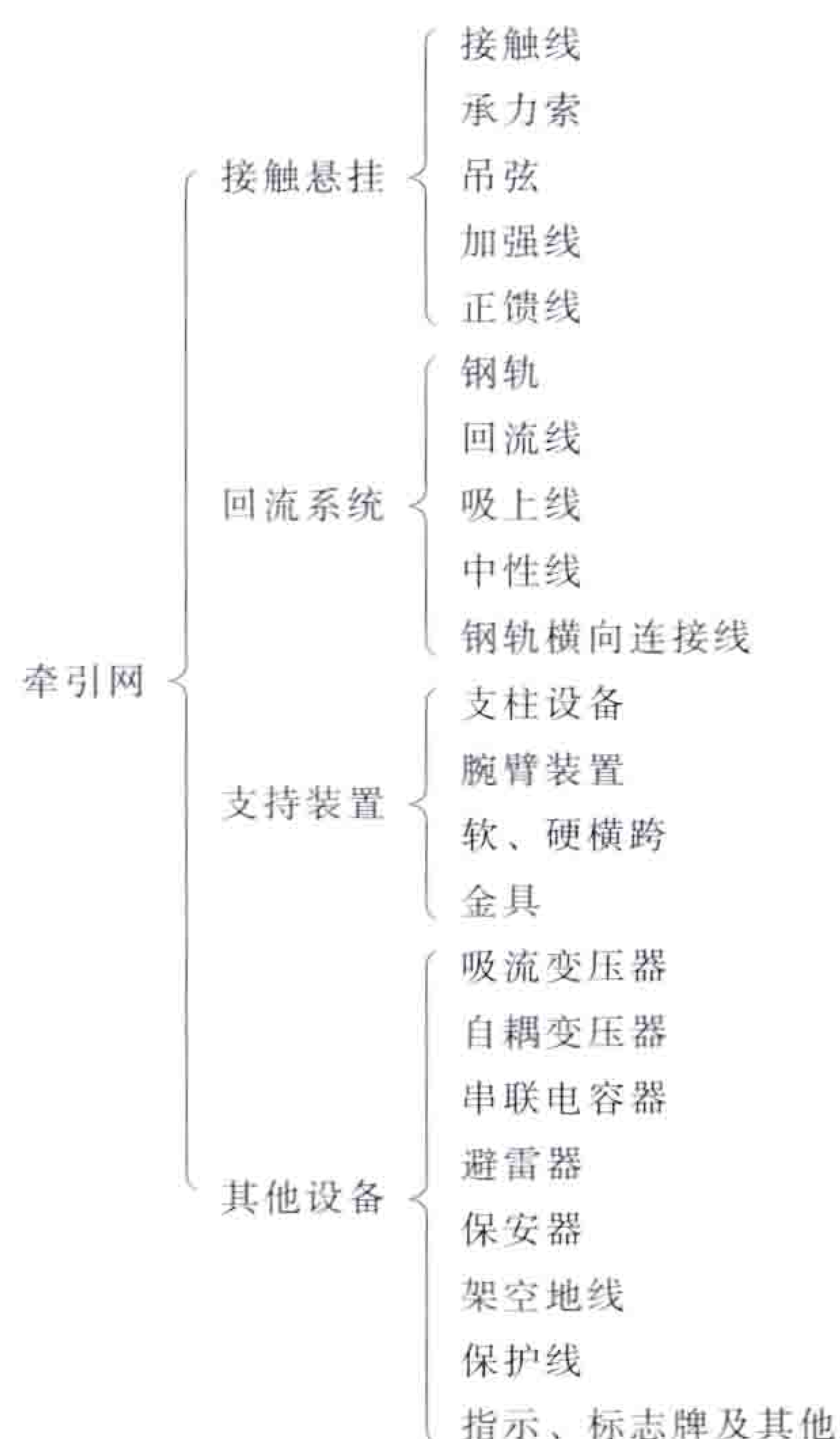


图1 牵引网形式分类示意图

（a）架空单线式；（b）架空复线式；（c）第三轨式

SS—牵引变电所；T—接触线；R—钢轨；K—第三轨

牵引网（见图2）由接触悬挂、回流系统、支持装置及其他设备组成，一般常将除回流系统外的其余三部分统称为接触网（见电气化铁路接触网）。详细分类如下：



接触悬挂中的接触线为具有沟槽的实体导线，起着与电力机车受电弓滑动接触和受流的作用。承力索则通过吊弦保持接触线的适当弧垂水平。加强线为与接触线同杆架设的导线，用以加大接触悬挂的载流能力。正馈线是AT牵引网特有的导线，它与接触线构成2×25kV馈电系统。回流系统中的回流线是一条与钢轨并联的导线，用以减少牵引回流泄入地中的分量，减轻对平行接近通信线的影响。在电力牵引BT供电方式中，两相邻吸流变压器间的回流线只能通过吸上线与钢轨作一处并联。中性线是电力牵引AT供电方式特有的，用于AT中性点与钢轨的连接，而钢轨横向连接线则是为了降低钢轨电位对不同铁路线路间的钢轨所作的并联连接。牵引网中的串联电容器是为补偿回路电压损失而设的一种装置。



图2 电力机车牵引网（严浩 摄）

qiandianjie

铅电解 （lead electrolysis） 以硅氟酸铅-硅氟酸的水溶液为电解液，进行电解精炼铅的冶金过程。传统的铅电解精炼是1901年由A. G. 柏兹（A. G. Befs）提出的，一直沿用至今。铅电解精炼的目的是获得高品位的电解铅，并使其中的铋及贵金属进入阳极泥。工厂生产的铅阳极含铅一般在98%～98.5%之间，还含有铋和贵金属以及铜、锑、砷、锡等杂质金属，通常需进行电解精炼。铅的电解精炼属可溶阳极电解，分为电解和电解液净化两个工序。电解是提纯过程；电解液净化是除去电解液中过量的铅离子及杂质离子，维持电解精炼顺利进行的过程。

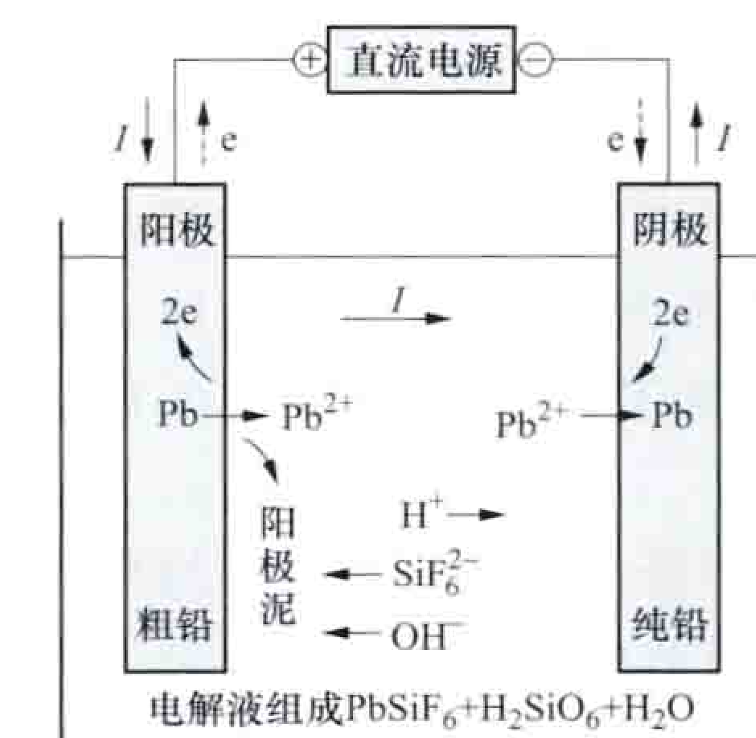
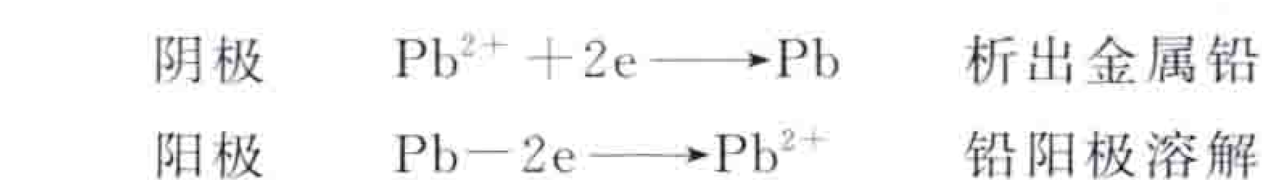


图1 粗铅电解精炼过程示意图

电解 以火法精炼产出的铅铸成阳极板，以电解产出的铅始极片为阴极，以硅氟酸铅-硅氟酸混合水溶液作为电解液，在电解槽中通直流电进行电解，如图1所示。在阴、阳极上发生如下的电化学反应



阴极 $Pb^{2+} + 2e \longrightarrow Pb$ 析出金属铅

阳极 $Pb - 2e \longrightarrow Pb^{2+}$ 铅阳极溶解

电解过程中，电解槽的槽电压为0.35～0.55V，电流密度为160～200A/m²，电流效率为93%～96%，生产每吨电解铅消耗直流电能100～150kW·h。电解铅纯度可达99.99%。

电解过程中，电解液必须循环，一般维持其温度在30～45℃，也有的达50℃。温度太高，会使电解液的蒸发和酸分解损失增大，影响电解槽内防腐衬里的寿命；温度太低，又会使电解液电阻升高，导致槽电压升高，电耗增加。电流通过电解液产生的热量，一般可使其电解温度达30℃

以上。在冬夏季节，当温度低于或超过控制范围时，需要进行加热或冷却。

铅的电化当量较大，电解过程中有阳极泥（残留在阳极表面和沉积在电解槽底部的不溶泥状物）形成，易出现浓差极化（见电极极化）；电解液的电阻较大，分散能力差；阴极结晶状态不平整致密，易产生树枝状及海绵状结晶。为此要向电解液中加入添加剂，常用的是骨胶、木质磺酸钠（钙）和β-萘酚。生产上广泛应用联合添加剂，其效果更好。

阳极泥是回收金、银、铋等有价金属的重要原料之一。生产过程中，阳极泥大部分附着在残极上，出槽时要把残极上的阳极泥刷洗掉。

电解槽通常采用钢筋混凝土制成，形状为长方形。为了防止电解液对槽体的腐蚀，其内壁必须加上内衬，普遍采用耐酸塑料、硬橡胶等作为衬里。还有用整体成型的聚乙烯塑料槽作为内部防腐衬里，外部为钢筋混凝土结构的电解槽，实践证明该槽不漏液，效果很好。

电解液净化　铅电解不设专门的净液工序，这是由于电极电位比铅的电极电位正的杂质，如铜、银、铋在电解过程中溶解量极少，一旦有微量溶解，即能在阴极析出，在电解液中不会造成积累；电极电位比铅的电极电位负的杂质，如锌、镉、铁等在阳极中的含量很少，不致造成积累和危害。阳极若含锡较高，能导致电解液和析出电解铅中含锡量升高，一般控制阳极中锡含量小于0.01%。若采用电解铅碱性精炼副产锡酸钠和从阳极泥中回收锡的工艺流程，可以不限制铅阳极中的锡含量。阳极中的砷（As）、锑（Sb）在阳极泥层中可能由于电化学和化学溶解，使电解液含As达0.3g/L，Sb达1～1.2g/L，相应的电解铅含As、Sb也高，但这些元素在熔化铸锭时很容易除去，不影响铅锭产品质量。铅电解液的长期反复循环使用，特别是添加剂用量控制不当时，会造成电解液中有机物含量的过量积累，使电解液电阻率升高，电化学性能下降，分散性降低，致使槽电压升高，电能消耗增加，析出铅结晶不好，很难产出平整致密的电解铅。可通过补入新的电解液，控制好添加剂的用量，减缓或基本消除这种现象。

铅电解精炼时，阴、阳极电流效率通常是不一样的，因此电解液中铅离子浓度经常偏离要求值。实际生产中一般阴极电流效率稍低，加上铅的化学溶解，电解液中铅离子浓度随着电解过程的进行不断上升，超出要求值上限时，需要通过脱铅来降低铅离子浓度。脱铅方法有硫酸脱铅和不溶阳极电积脱铅，通常采用不溶阳极电积脱铅法。硫酸脱铅是抽出部分电解液加入浓度为20%～25%的硫酸，铅呈硫酸铅沉淀从电解液中除去。加硫酸脱铅操作简单，脱铅速度快，但产出的硫酸铅要过滤干燥，处理麻烦。不溶阳极电积脱铅是用石墨电极做阳极，以铅始极片做阴极，直接利用电解生产用槽处理。该方法脱铅速度较缓慢，虽析出的电解铅含杂质稍高一些，但可作生产始极片的原料或分批装入电铅铸型锅搭配使用。电积脱铅还能破坏电解液中残存的有害有机物，有利于改进析出铅结晶，缺点是电能消耗较高，每脱除1t铅耗电约800kW·h。若阳极品位过低，电解液游离硅氟酸含量较少，此时阳极电流效率低于阴极电流效率，电解液中铅离子浓度会下降到要求值以下，需要补充硅氟酸铅以提高铅离子浓度。在条件许可时调整阳极含铅，可以使电解液中铅离子基本稳定。电解铅生产线如图2所示。



图2　电解铅生产线

参考书目

何启贤．铅锑冶金生产技术．北京：冶金工业出版社，2005.

qiansuan xudianchi

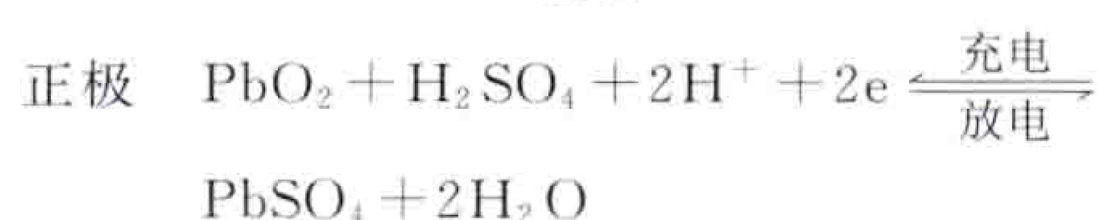
铅酸蓄电池

铅酸蓄电池　(lead-acid battery)　正极活性物质为PbO_2，负极活性物质为海绵状铅，电解液为硫酸的蓄电池。其电化学式为：⊖Pb｜H_2SO_4｜PbO_2⊕。

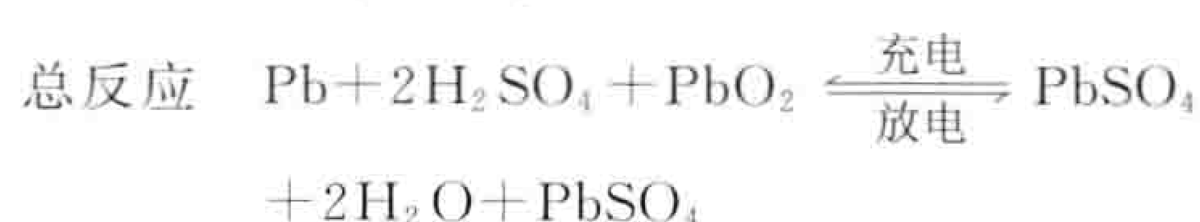
充、放电时的电极反应为



负极　$Pb + SO_4^{2-} \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} PbSO_4 + 2e$



正极　$PbO_2 + H_2SO_4 + 2H^+ + 2e \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} PbSO_4 + 2H_2O$



总反应　$Pb + 2H_2SO_4 + PbO_2 \underset{放电}{\overset{充电}{\rightleftharpoons}} PbSO_4 + 2H_2O + PbSO_4$

结构　除正、负极和电解液之外，组成蓄电池的零部件还有由电池槽、盖等组成的容器、隔板、排气机构等。

在蓄电池槽中把若干片正、负极板互相交叉排列成组，两端都是负极板，两极板之间插入隔板。极板组或者固定在电池槽底部的鞍板上，或者悬挂在电池槽的上缘上，见图1。

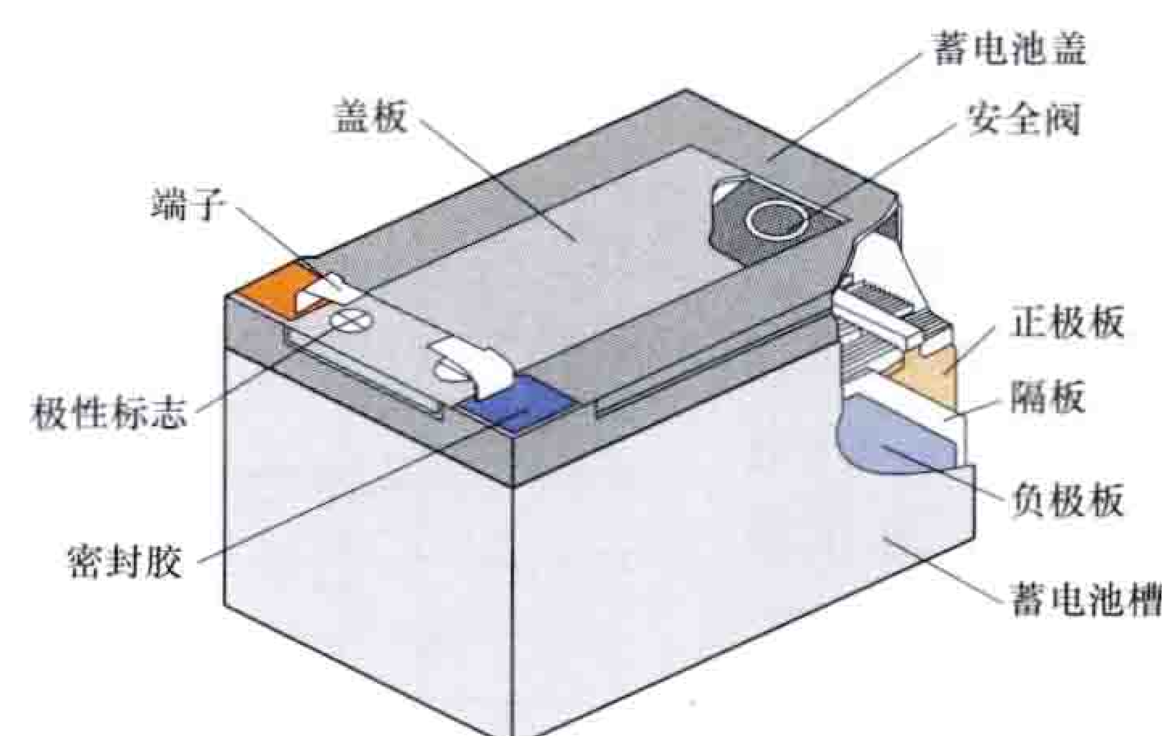


图1　铅酸蓄电池结构示意图

极板主要用于增加活性物质的表面积，种类繁多，主要有普朗特式、涂膏式、管式等。普朗特式极板是用电解法使纯铅表面生成活性物质PbO_2，用作正极。涂膏式极板是把活性物质的膏状物填充到以铅或铅合金制成的板栅体上的极板（见图2），可用作正极板或负极板。管式极板是用铅合金制的骨芯，穿过多孔性管的中心，在骨芯和管壁之间填

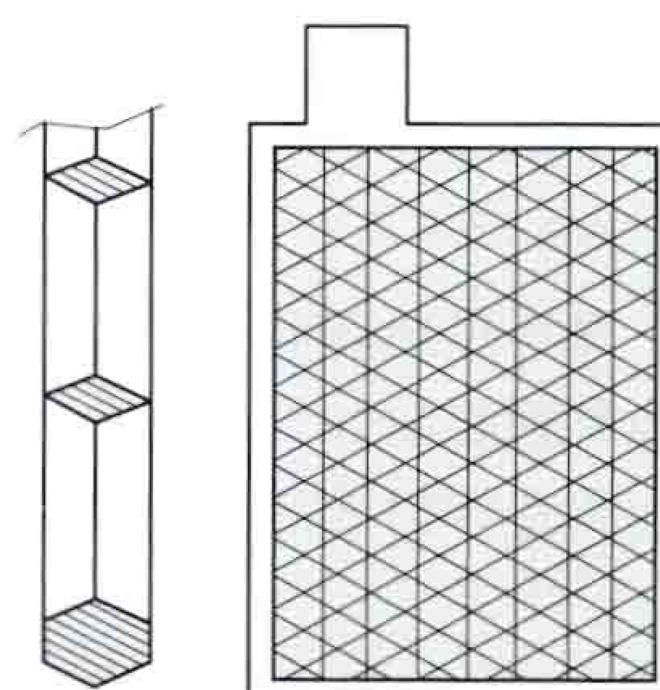


图2　涂膏式极板剖面图

满活性物质，制成棒状电极，见图3，再用多根棒状电极并排构成板状电极，这种电极只能用作正极板。

隔板可防止极板短路并使其保持一定距离。以前多用木材作隔板，现在已被增强纤维、微孔橡胶、微孔合成树脂制成的隔板所代替。隔板应耐酸，其微孔应能防止铅的迁移，浸透性良好，有需要的机械强度，在使用期限内不老化、不变形等。

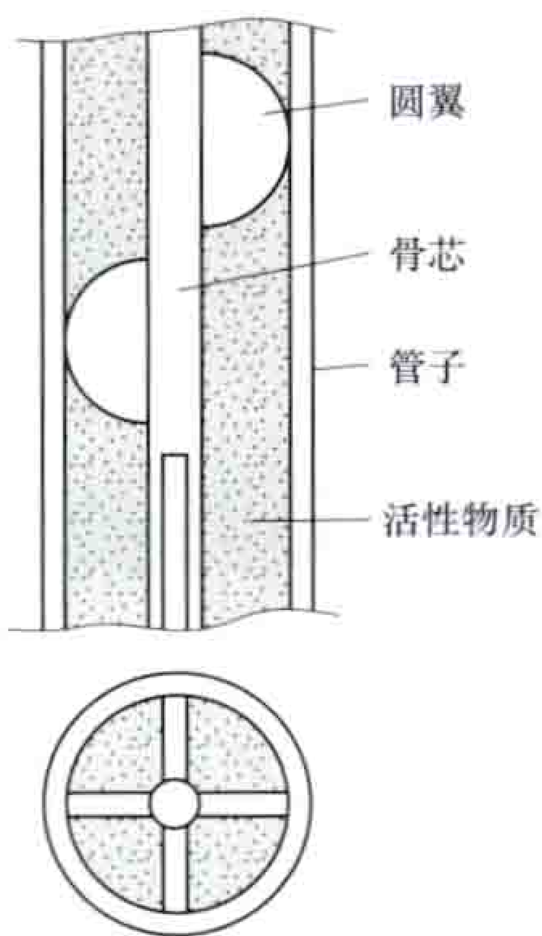


图3　管式极板剖面图

电解液由硫酸和水配制而成。电解液中的杂质会降低蓄电池的性能，应用蒸馏水配制稀硫酸。在充电末期电解液的密度为1.25～1.30g/cm³。

常用的蓄电池槽有玻璃槽、硬橡胶槽、沥青混合槽、合成树脂槽等。包括装有一只电池的单槽和装有多只电池的复合槽。单槽多用于大容量固定式蓄电池，复合槽多用于4～24V的小型电池组。

除开放式的蓄电池外，一般都装有蓄电池盖。盖上装有贯通接线柱和注液孔、排气孔等。普通铅酸蓄电池在充电后期或搁置期间，由于发生正极析氧、负极析氢反应，电解液中水分不断损失，需要经常加水维护。为克服该缺点，密封式铅酸蓄电池在密封式镉-镍蓄电池发展成熟后也逐步完善起来，工作原理与密封式镉-镍蓄电池基本相同，这种电池不漏气、不漏液，自放电损失小，使用过程中不需加水维护。

电池特性　主要包括电动势，充、放电特性，容量，寿命，用途等。

电动势　平均值在1.839～2.139V之间。硫酸浓度越高，电动势越高；当硫酸在其通常使用范围内时，温度越高，电池的开路电动势越高。

充、放电特性　以一定的电流充、放电时，电池的端电压、电解液的密度和温度等随时间所发生的变化通常用曲线表示。电站用铅酸蓄电池的充、放电特性曲线如图4所示。充电开始时，电压缓缓上升，接着，电压急剧上升。这时，水发生分解，在负极产生氢，在正极产生氧，单电池端电压约为2.6V。放电开始几分钟内，电压急骤下降，然后缓慢降低，最后迅速降低。缓慢降低的时间越长，平均电压越高，电池特性也越好。特性曲线受放电率、温度、电解液密度、电池构造等因素的影响而有很大的变化。

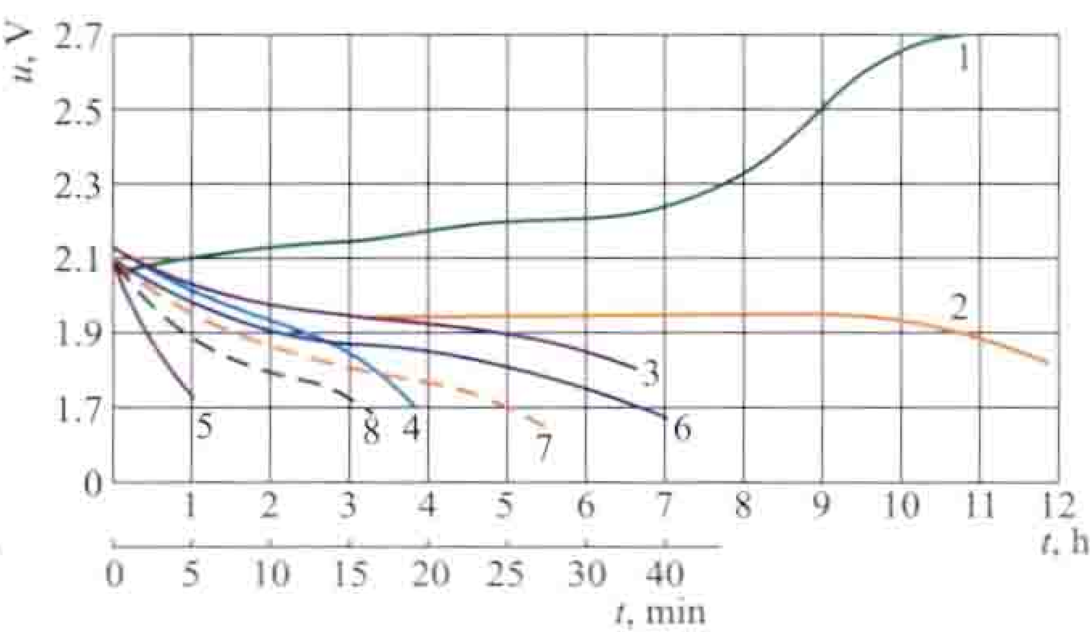


图4　电站用铅酸蓄电池充、放电特性曲线（GGF-300型）
1—正常充电曲线；2，3，4，5—30，50，70，150A放电曲线；6，7，8—180，210，240A放电曲线；t，h—曲线1～5用；t，min—曲线6～8用

容量　铅酸蓄电池容量指蓄电池在完全充电状态放电到规定的放电终止电压时能够取出的电量，用A·h（安·时）或W·h（瓦·时）表示。蓄电池容量受放电电流强度和温度的影响，放电强度大、温度低则容量小。

铅酸蓄电池的理论比能量为170W·h/kg。固定用铅酸蓄电池的质量比能量为10～15W·h/kg，电动车辆用的约为20W·h/kg，汽车用的为25～30W·h/kg。

寿命　铅酸蓄电池的放电容量，在每一充、放电循环中都不一样。使用一段时间之后，活性物质从极板上脱落，沉积在电池槽底部，经过一定时间，容量急速减少，达到寿命的终期。以充、放电循环次数表示的寿命，传统固定型铅酸蓄电池为250～300次，起动型铅酸蓄电池为150～250次。阀控式密封铅酸蓄电池循环寿命为500～600次。


图5　铅酸蓄电池

用途　铅酸蓄电池的代号及用途见表，外观见图5。

铅酸蓄电池代号及用途

代号	含　义	用途及特性
Q	起动用	供汽车、拖拉机、柴油机、船舶起动和照明。要求大电流放电，低温起动，电池内阻小，用涂膏式极板
G	固定用	供通信、发电厂、计算机系统作为保护、自动控制的备用电源
D	（电力）牵引用	供各种蓄电池车、叉车、铲车等的动力电源
T	铁路客车用	供铁路内燃机车、电力机车、客车起动、照明的动力
HK	航空、潜艇用	供飞机起动和照明、通信，用作潜艇水下航行动力源和照明。容量大，大电流放电，充电快
DG	蓄电池车用	供蓄电池车作为牵引及照明电源，极板厚，容量较大
QA	轿车、摩托车用	同起动用蓄电池，供摩托车起动和照明，要坚固耐磨，不漏电解液
CN	储能用	供风力、太阳能等发电用电能储存
N	内燃机车用	供铁路内燃机车的起动及辅助用电设备

qianshui dianji

潜水电机　（water-submerged motor）　与潜水泵组成一体潜入水下工作的立式专用三相笼型感应电动机。潜水电机广泛用于排灌和高原山区汲水。电机本身是笼型感应电动机，但为了适应水下工作的条件，对定子绕组及电机结构做了特殊处理，通常采用2极电机，并尽可能减小体积及质量。其常用结构有水封式、干式、油封式、密封罐式。

水封式潜水电机　在电机内部充满清水，各止口接合面

装“O”形圈密封，轴伸端装有单端面或油封的防沙密封装置。定子绕组通常采用聚乙烯尼龙护套耐水电磁线，以穿线工艺下线；绕组与引出电缆的接头用自粘胶带包扎。电机的轴承以水作润滑剂，零部件采取必要的防锈、防腐蚀措施。

干式潜水电机　电机的内部结构与普通电机相同，主要依靠良好的机械密封装置或气垫防止外部水分浸入电机内部。

油封式潜水电机　结构与干式潜水电机相同，电机内部充油，其定子绕组采用加强绝缘的耐油、耐水漆包线，以穿线工艺下线，绕组引出电缆的接头要密封可靠。电机下端装有保压装置，保证电机内部油压稍大于外部水压，并有贫油保护装置。由于电机内部温升引起的呼吸作用，往往造成内油外渗，故仅用于容量较大的电机。

密封罐式潜水电机　将定子用密封罐密封起来，转子浸在水中，适用于制成4kW以下的小型电机。

qianyou dianji

潜油电机　(oil-submerged motor)　能浸在规定深度的油井中工作的电动机。它一般为立式三相笼型感应电动机，与多级离心泵组成潜油电泵，可潜入几百米至3000m深的油井中，连续可靠地抽取井下原油或井液。

由于油井井径较小，电机定子的外径受到限制，过去只能靠增加长度来增加电机的容量，受电源频率的限制，为了提高转速，只能用2极电机，可依靠变频电源升频以提高转速和缩短长度。

潜油电机内腔充油密封，由定子、转子、基本支撑件、引出线装置和循环过滤器组成。其主要特点是电机细长，定、转子铁芯分为若干段，定子各段间用黄铜片隔开以支撑轴承，每段转子铁芯具有独立的笼型绕组，各段转子间装有中间滑动轴承，其青铜轴套固定在轴上，钢轴瓦固定在定子黄铜片的内圆上，支座推力滑动轴承，滑动轴承和黄铜片等组成基本支撑件，循环过滤器由泵叶轮、过滤筒、过滤网及永久磁铁组成，起过滤和循环油液的作用。

qiedian

窃电　(theft of electricity)　采用不正当手段，使供电企业的电能计量装置不记录或少记录电量的用电行为。盗窃电能，不仅扰乱了正常的供用电贸易结算秩序，而且还危及供用电双方的安全及电能的经济合理使用。世界各国法律都严格禁止窃电行为，对窃电者均有严厉的处罚规定。《中华人民共和国电力法》《电力供应与使用条例》对窃电行为、窃电处罚都有明确具体的规定。

窃电行为　中国法律禁止的窃电行为包括：①在供电企业的供电设施上，擅自接线用电。②绕越供电企业的电能计量装置用电。③伪造或者开启法定的或授权的计量检定机构加封的电能计量装置封印用电。④故意损坏供电企业电能计量装置。⑤故意使供电企业的电能计量装置不准或者失效。⑥采用其他方法窃电。

窃电处罚　世界各国对窃电处罚的做法不尽相同。美国、法国、英国等国家，对查获的窃电者，除当场停止供电外，还将窃电者移送司法机关处理，由法院根据窃电的事实做出罚款或判刑。中国在《中华人民共和国电力法》《电力供应与使用条例》和《供电营业规则》中规定：对查获的窃电者，电力管理部门责令其停止违法行为，并处以应交电费5倍以下的罚款；构成犯罪的，依照刑法追究刑事责任。供电企业对查获的窃电者，除可当即采取中止供电措施外，窃电者还应按所窃电量补交电费并承担补交电费3倍的违约使用电费；窃电数额较大或情节严重的，供电企业可提请司法机关依法追究刑事责任。因窃电导致他人财产或人身安全受到侵害的，窃电者除停止侵害外，还要承担损害的赔偿责任。

qinggui jiaotong

轻轨交通　(light rail transit)　采用轻型结构的城市轨道交通，又称轻轨铁路。轻轨交通是20世纪70年代发展起来的一种中等运量的快速轨道交通，实际上是现代化的有轨电车。它既可在地面（通常有专用行车轨道）行驶，又可与地下铁道线路相连进入地下隧道，或在高架轨道线路上运行。轻轨交通具有速度快、建造方便、造价较低、适应性强、效率高、乘坐舒适等优点。它是有发展前途的城市公共交通工具。

轻轨交通牵引用电属于一类负荷（见用电负荷级别），应由双电源供电。电源由城市电网供应。变电所一般采用交流10kV分散供电方式，电压选用国际标准直流750V，并采用架空接触网或第三轨馈电方式。旧式有轨电车线路采用的直流600V电压标准，在其尚未改造成轻轨交通之前，可保留使用。

电动车辆车体采用全金属轻型结构（铝或铝合金），单位车体长度的自重在11 200～14 500N/m。有四轴（两台转向架）单车厢、六轴（三台转向架）两车厢铰接车和八轴三车厢铰接车。在实际使用时，根据运营需要，采取单车运行或几节车辆编组运行。

电动车辆的传动及控制采用单臂Z型受电弓，并能同时适应轻轨交通地面上采用架空导线供电，而在隧道内则采用第三轨供电的两种供电方式的要求，为此车上装有两套受流装置，进出隧道时能自动转换。

轻轨交通驱动系统的主转向架由一台电动机驱动。牵引电动机采用纵向布置，两端有输出轴，通过万向节驱动两对车轮，使转向架达到小型、轻量化。一般单车厢用一台驱动转向架，铰接车两端为主动转向架，中间铰接处设有从动架。

轻轨交通的动力性能指标高于传统的有轨电车。因其采用晶闸管斩波器控制，可实行再生制动，所以动力消耗指标较低，每人每千米耗能约为公共汽车的1/3，运行速度一般为25～35km/h，车辆造价比地铁、动车低25%左右。轻轨交通所需投资为地铁投资的1/3～1/2，运营费用也低，对环境适应性强。德国研究证明，在单向客流量达到4000～5000人/h的情况下，应考虑轻轨交通。根据中国情况，有观点认为客流量在1万人/h左右时，应采用轻轨交通。

qingjie fazhan jizhi

清洁发展机制　(clean development mechanism)　一种驱动温室气体减排的运作方式。清洁发展机制是根据《京都议定书》第十二条建立起来的，是由发达国家与发展中国家

合作减排温室气体的灵活机制。清洁发展机制的核心是允许发达国家通过提供资金和技术的方式，与发展中国家开展项目级的合作，获得由项目产生并核证的温室气体减排量，用于发达国家缔约方完成《京都议定书》规定的减排或限排义务。

《京都议定书》是人类历史上首次在防止气候变化和定量减少温室气体排放方面具有法律约束力的国际条约，自2005年2月16日开始正式强制生效。《京都议定书》规定在第一承诺期内（2008～2012年），所有发达国家的温室气体排放量要在1990年排放量基础上平均减少5.2%，其中，欧盟削减8%，美国削减7%，日本削减6%，加拿大削减6%，东欧各国削减6%～8%，新西兰、俄罗斯和乌克兰可稳定在1990年水平上，允许爱尔兰、澳大利亚和挪威可比1990年分别增加10%、8%和1%。为帮助发达国家缔约方完成规定的减排指标，《京都议定书》提出了“联合履行”(JI)、“清洁发展机制”（CDM）和“排放贸易”（ET）3种境外减排的灵活机制。截至2011年底，全球共有183个国家批准通过了《京都议定书》，这183个国家的排放总量超过全球排放总量的61%。电力需求侧管理能够显著提高能效，减少温室气体排放，因此，清洁发展机制被看做是推动电力需求侧管理项目开展的重要机制。

方式与程序　清洁发展机制是基于项目一级的活动，一个清洁发展机制项目自提出到获得经核证的温室气体排放量，包括8个主要阶段：①确认参与条件和模式；②编写项目设计书；③项目审定；④缔约方国家批准；⑤项目注册；⑥项目运行和监测；⑦项目核查和核证；⑧排放量签发。

项目分类　清洁发展机制项目可按《京都议定书》规定的6种温室气体，分为温室气体减排项目和温室气体吸收项目，再按项目规模细分为小型项目和大型项目。温室气体减排项目包括工业、农业、能源、交通、居民生活等方面的节能以及可再生能源、能源替代、资源回收利用等。温室气体吸收项目还仅限于考虑CO_2的吸收，即造林和再造林项目。

项目识别　清洁发展机制项目主要包括：①改善终端能源利用效率；②改善供应方能源效率；③使用可再生能源；④使用低碳燃料替代高碳燃料；⑤农业过程中的减排项目（如甲烷和氧化亚氮减排项目）；⑥工业过程中的减排项目（如减排氢氟碳化物、全氧化碳或六氟化硫的项目）；⑦碳汇项目（仅适用于造林和再造林项目）。如果拟开展的项目不属于上述类别范畴，即使可以产生实际的减排效果，也不能作为清洁发展机制项目。

项目要求　《京都议定书》对清洁发展机制的参与国及项目的开发实施都有明确要求：①所有的参与成员国都必须是自愿参与并建立国家级清洁发展机制主管机构。②工业化国家需完成《京都议定书》第三条规定的分配排放数量，建立国家级的温室气体排放评估体系，建立国家级的清洁发展机制项目注册机构。③提交年度清单报告，为温室气体减排量的买卖交易建立一个账户管理系统。④获得项目涉及的所有成员国的正式批准。⑤促进项目东道国的可持续发展。⑥在缓解气候变化方面获得额外的、真实的、长期的和可测量的温室气体排放效益。

应用情况　中国清洁发展机制管理体制由国家气候变化对策协调小组、国家清洁发展机制审核理事会、国家清洁机制项目管理机构组成。国家发展和改革委员会、科技部、外交部、财政部联合发布了《清洁发展机制项目运行管理办法》，于2005年10月12日起生效。该办法的主要内容包括：①中国开展清洁发展机制项目的重点领域；②开展清洁发展机制项目应满足的条件；③中国政府管理和审批清洁发展机制项目的机构和程序；④清洁发展机制项目产生的温室气体减排量由中国政府和实施项目的企业共同所有。一些省份已经设立清洁发展机制技术服务机构，促进中国企业与发达国家合作开发清洁发展机制项目。中国的清洁发展机制项目涉及风力发电、小水电、工业节能、垃圾填埋气发电等范畴。如荷兰政府和中国政府签署的中国内蒙古自治区辉腾锡勒风电场项目，中国国家林业局与意大利环境国土资源部签署的中国东北部敖汉旗防治荒漠化青年造林项目。



ranliao dianchi

燃料电池 (fuel cell) 连续地将燃料的化学能直接转变为电能的化学电源。燃料电池主要由正极（又称氧化剂电极）、负极（又称燃料电极）和电解质组成。正、负电极多采用以贵金属作催化剂的气体扩散电极。负极活性物质，即燃料，有气态的（如氢、氨气、一氧化碳及碳氢化合物等）、有液态的（如肼、甲醇、高阶碳氢化合物和液态金属等）、有固态的（如碳等）。正极活性物质，即氧化剂，常用氧、空气、过氧化氢等。电解质为酸或碱的水溶液、熔融盐或为固体氧化物及聚合物。按采用的电解质和工作温度的不同，可分为5种，见表。

燃料电池一般有转换效率高（理论转换效率为100%，实际可达80%）、污染小、电流密度高（已达4000mA/cm^2）、寿命长（已达40 000h）、噪声低等优点，可制成无声、可靠、不需维护的电源。

原理　与其他电池不同，燃料电池的正、负电极本身不包含活性物质，只是催化和集流的转换元件。电极接触电解质溶液的层面完全被电解液浸透，接触气体的层面则被气体所充满，在电极内部形成气体、液体、固体电极之间的三相界面，正是在这一界面附近进行着电化学反应。正、负极活性物质，即氧化剂和燃料是由外部源源不断地输入到电池的正、负电极上，进行电催化反应，产生电能。

碱性氢-氧燃料电池的电化学式可表示为

$$\ominus H_2(Ni)|KOH\ 30\%|O_2(Ni)\oplus$$

其原理见图。电池放电时，负、正极反应为

负极　$2H_2+4OH^- \longrightarrow 4H_2O+4e$

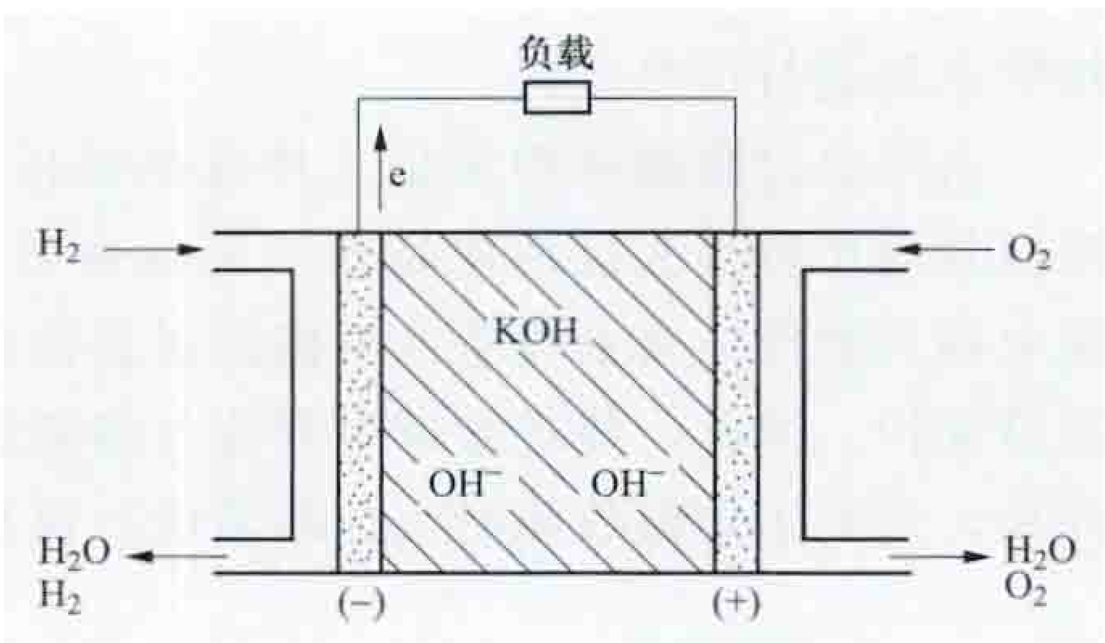
正极　$O_2+4e+2H_2O \longrightarrow 4OH^-$

总反应　$2H_2+O_2 \longrightarrow 2H_2O$+电能+热能

燃料电池的分类

分类	低温燃料电池（60～120℃）		中温燃料电池（160～220℃）	高温燃料电池（600～1000℃）	
	碱性燃料电池（AFC）	质子交换膜或聚合物电解质燃料电池（PEMFC）	磷酸燃料电池（PAFC）	熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）	固体氧化物燃料电池（SOFC）
电解质	氢氧化钾溶液	质子可渗透膜	磷酸	锂和碳酸钾	固体电解质（锆石氧化物）
燃料	纯氢	氢、甲醇、天然气	天然气、氢气、甲醇	天然气、煤气、沼气	天然气、煤气、沼气
氧化剂	纯氧	大气中的氧气	大气中的氧气	大气中的氧气	大气中的氧气
转换效率	60%～80%	43%～58%	43%～58%	50%	50%～65%

为将燃料和氧化剂不断地输送给燃料电池，需要有燃料和氧化剂的供给系统。为将反应产生的水和热及时从电池中排出，需要有排水系统、排热系统及控制等辅助系统。



氢-氧燃料电池原理示意图

发展简史　1839年，英国人W.R.格罗夫（William Robert Grove，1811—1896）发表了在电池中氢的氧化反应产生能量的报告，3年后创制了由氢-氧电池组成的电池组。这种电池采用了价格昂贵的铂电极，没有得到推广。20世纪30年代，英国人F.T.培根（F.T.Bacon）研究过中温氢-氧燃料电池。改进的培根电池于1965年成功地应用于美国阿波罗宇宙飞船上。中国自20世纪60年代末开始研究燃料电池，70年代组装了10、20kW以NH_3分解气为燃料的碱性氢-氧燃料电池组，80年代研制成功千瓦级水下用燃料电池，90年代开始研究质子交换膜燃料电池（PEMFC），熔融碳酸盐燃料电池（MCFC）和固体氧化物燃料电池（SOFC），并已组装成单体电池。燃料电池正朝着地面用燃料电池实用化和空间、深海用燃料电池的改进和提高方向发展。

用途　在军事领域，由于具有高效、寿命长及工作过程安静等优点，质子交换膜燃料电池用途广泛，从战场的移动手提装备到海陆运输均有应用；在电子产品电源领域，直接甲醇燃料电池具有令人乐观的前景，已有试验性产品；由于使用大量稀贵金属，碱性氢-氧燃料电池成本高昂，仅在航天等高端领域有应用；在电动汽车领域，利用质子交换膜燃料电池提供动力的车辆已经实现商品化；在固定应用场合，磷酸型燃料电池用于为医院、学校和小型电站提供动力，美国、日本和德国有使用质子交换膜燃料电池为家庭提供能源的应用。

参考书目

肖钢．燃料电池技术．北京：电子工业出版社，2009.

raoxian zhuanzi ganying diandongji

绕线转子感应电动机 (wound-rotor induction motor; slip-ring induction motor) 定子上的一次绕组连接于

电源，转子上具有与集电环连接的多相绕组的感应电动机。图为三相绕线转子感应电动机结构示意图。转子三相对称绕组可以接成星形或三角形。这种转子的特点是转子绕组可以外接电阻，以改善电动机的起动性能或用以调节转速。与笼型转子比较，绕线转子结构较复杂，价格较贵，主要用在要求起动电流小、起动转矩大，或需要平滑调速的场合。

绕线转子感应电动机的起动方法主要有：①转子串频敏变阻器起动；②转子串电阻起动（见交流电动机起动）。为了在整个起动过程中尽量保持较大的起动转矩，可以在电动机转起来以后，采用逐级切除起动电阻的分级起动。除上述优点外，还因转子只串电阻没有电抗，起动过程中功率因数比串频敏变阻器起动时高，且起动电阻可同时兼作调速电阻。

三相绕线转子感应电动机结构示意图

为了防止电动机在运转时电刷磨损和减少摩擦损耗，有的电动机装有电刷提起装置。当电动机起动完毕时，利用这种装置，把转子绕组彼此短路，然后将电刷从集电环上提起。

绕线转子感应电动机的主要调速方法有：①交流调压调速；②转子串电阻交流调速；③交流串级调速。

reguozai jidianqi

热过载继电器

(thermal over-load relay)　利用电流通过发热元件所产生的热效应而反时限动作的继电器，简称热继电器。热继电器广泛地被用作交流电动机的过载保护，有的还用作电动机的断线保护。

热过载继电器由双金属片、发热元件、触点、机械传动机构及其附件等组成。其中，双金属片由具有不同线膨胀系数的两个金属片辗压复合而成。线膨胀系数大的金属片称为主动片，线膨胀系数小的金属片称为被动片。当双金属片受热时，每一种金属都伸长，但因线膨胀系数不同，金属片的伸长幅度不同，从而使双金属片向被动片一侧弯曲，温度越高，弯曲越大，当达到一定弯曲程度时，通过机械传动机构使串联在控制回路中的触点断开，切断被控主电路的电源，起到保护作用。双金属片受热可采用直接加热、间接加热和复式加热 3 种方法：①直接加热。使电流通过双金属片本身自行加热。②间接加热。将康铜或镍铬合金等电阻材料制成的发热元件串接于被保护设备的主电路中，当电流通过发热元件时产生热量，使置于热元件附近的双金属片受热。③复式加热。同时采用直接加热和间接加热两种方式使双金属片受热。

热过载继电器的结构和工作原理如图 1 所示，图中 95、96、97、98 表示触点标号。热过载继电器外形见图 2。

热过载继电器装有电流调节凸轮用以调节整定电流，可以无级地在整定区域内将整定电流调到规定的值；温度补偿装置可以保证其动作特性在周围介质温度 −20～60℃的范围内基本不变。复位按钮用以调节复位方式，有手动和自动两种复位状态，在“手动复位”位置上，操动试验按钮后，热过载继电器停留在断开状态，必须用复位按钮才能使其重新复位；在“自动复位”位置上，当松开试验按钮时可以立即自动复位。试验按钮可模拟继电器脱扣，使动断触点断开而动合触点闭合。还有差动式断相/三相不平衡保护装置可进行断相/三相不平衡保护。

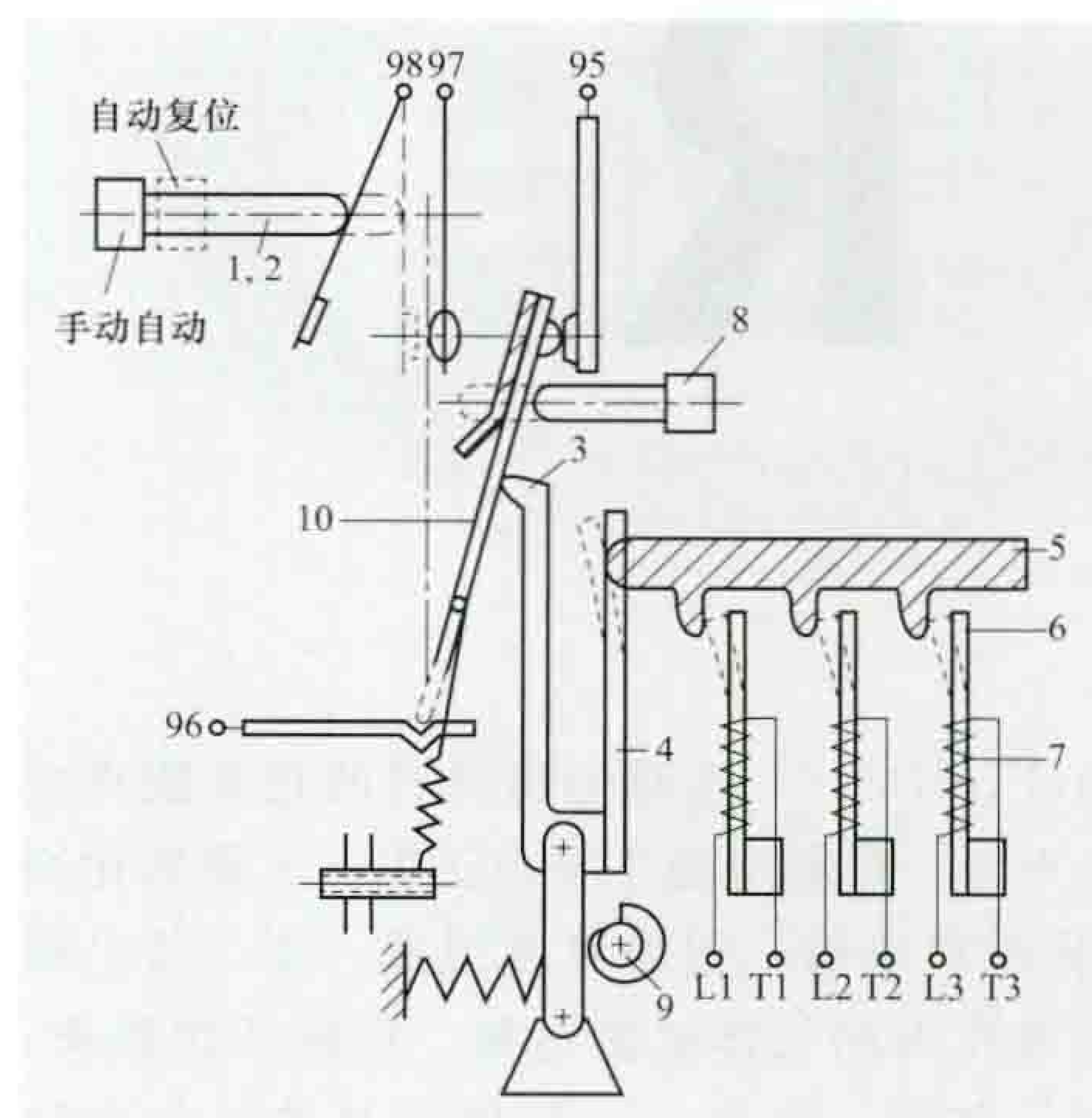


图 1　热过载继电器的结构和工作原理
1—手动自动复位调节；2—复位按钮；3—脱扣杆；4—温度补偿片；5—导板；6—双金属片；7—发热绕组；8—试验按钮；9—调节旋钮；10—摆动跷板

使用热过载继电器时应将发热元件或双金属片直接串接于被保护设备的主电路中，将继电器触点接于相应的控制电路中，如将热过载继电器的动断触点串接于接触器线圈回路，动断触点动作可实现分断主电路的自动保护，而其动合触点根据需要与指示灯或其他信号回路相连接，以便及时反映电路工作状态及进行信号监视。



图 2　热过载继电器

由于热过载继电器测量元件有热惯性，使动作有延时，所以其动作特性为反时限特性（见熔断器）。这使得热过载继电器只能作为用电设备或电路的过负荷保护，而不能作为短路保护。因此，热过载继电器应与熔断器串联连接，配合作用，当发生短路故障时由熔断器进行保护。

relianzhaji diankong xitong

热连轧机电控系统

(electric drive control system for hot tandem mill)　用以实现热连轧机正常运转的电力拖动和控制等电路组合的总体。热连轧机主要用以生产厚度在 12mm 以下的薄板或钢卷。

热连轧机主要由板坯加热炉、粗轧机组、精轧机组、输出辊道和地下卷取机组等组成。由初轧机（或连续铸锭机）生产的方形坯料经加热炉加热后进入粗轧机组。在全连续式热连轧机中，粗轧机组在立式破鳞机后一般有 4～6 台水平机架。为缩短粗轧区的轧线长度，粗轧区最后两个机架应保持尽可能小的张力。精轧机组通常由一台除鳞装置和 6～7 台精轧机架组成，机架间距离很短，在轧制时板坯跨接在精

轧的各个机架之间并通过设在机座间的活套机构维持微小的带钢张力。经过精轧机组轧制后的带钢通过输出辊道冷却并送入卷取机组。卷取机必须在 10～12m/s 或略低的速度时咬入带钢开始卷取，并随着精轧机组加速到较高速度。这样每轧一块板坯就有一次加/减速重复，因而要求精轧机组必须采用可逆晶闸管变流器单独供电。通常逆变装置的容量为整流装置的 1/5～1/3。为减小惯性和提高加速能力，粗轧机组中的可逆机架多采用单辊传动方式，精轧机架多用双枢或三枢电动机传动，同时还配置有一套复杂的控制和计算机自动化系统，以实现从加热炉输入辊道至卷取机运输链的全线自动化的各项控制要求。

热连轧机电控系统主要包括粗轧机电控系统、精轧机电控系统、卷取机和其他辅助传动电控系统及计算机控制系统。

粗轧机电控系统　粗轧机主传动通常采用上下辊分别由电动机单独传动的方式，多采用多相（通常为 12 相）可逆晶闸管变流器供电，速度闭环控制，在弱磁范围励磁电流和电枢电压非独立调节，工作制和控制要求类似可逆热轧机电控系统。粗轧机组的最后两个机架，为实现最小张力控制（MTC），前面机架采用可调速直流电动机传动，晶闸管供电闭环控制，后面机架采用同步电动机传动，速度恒定。张力控制的基本工作原理是采用间接测张力法计算这两个机架间张力，然后将计算值和张力给定值（即给定的最小张力）比较，并通过调节轧辊转速来消除张力偏差实现张力控制。张力控制系统框图如图 1 所示。全部过程的计算通常通过过程计算机（或部分硬件模拟放大器）实现。其中的转矩关系，有些系统通过检测传动电动机电流及转速等参数，用现代控制理论中某些方法组成观测器来实现。这种间接测张力的方法在精度上都有很大的局限性。

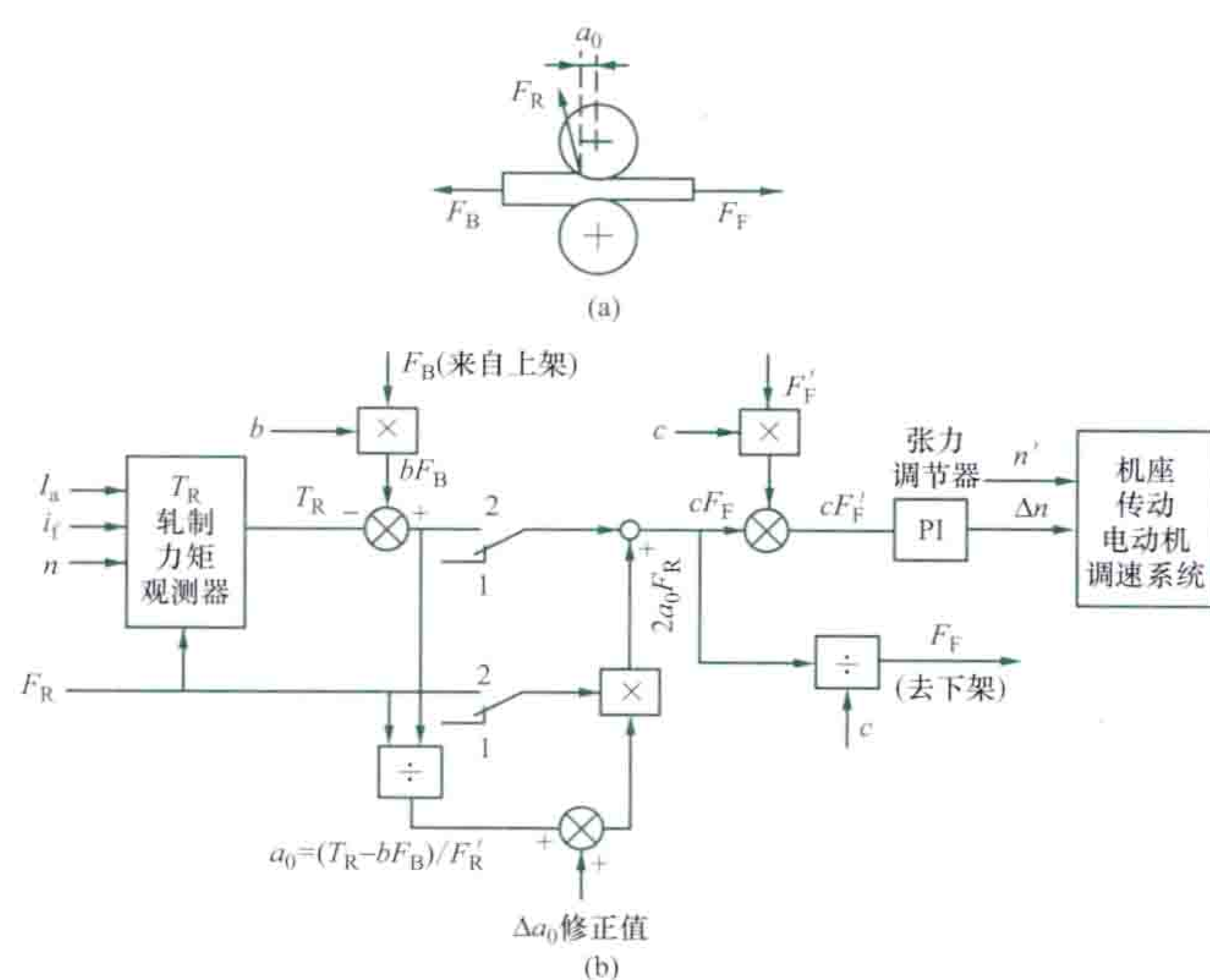


图 1　张力控制系统框图

(a) 轧制力和轧制张力；(b) 最小张力控制框图

F_R—有张力轧制时的制压力；a_0—无张力轧制时的轧制力臂；F_B—轧件入口侧张力；F_F—轧件出口侧张力；I_a—主传动电动机电枢电流；i_f—主传动电动机励磁电流；n—主传动电动机实测转速；F'_R—实测轧制力；b、c—计算系数；n'、F'_F—转速、张力设定值；Δn—实现最小张力控制时的转速修正值；1—测量；2—调节

此外，在有的轧机中还设有宽度控制（AWC），目的在于提高成品的尺寸精度，保证在全部长度范围内宽窄一致，减少切边和能源消耗。宽度控制的主要功能包括前馈控制、反馈控制和短行程控制。前馈控制是按照测得的沿长度方向的宽度和温度的变化，经过恰当延时预先调节立辊侧压开度设定值来实现；反馈控制是通过测量立辊的轧制力变化调整侧压开度以补偿机架弹跳变化的影响；短行程控制是通过修改侧压装置开度设定值，改善头尾部情况实现控制。

精轧机电控系统　精轧各机架的主传动电动机通常用单独的不对称可逆晶闸管变流器供电，三相桥式整流和反并联可逆。在个别电力系统容量较低的场所，亦采用发电机组供电和晶闸管励磁系统。控制回路的基本结构为电流内环和速度外环，内环截止频率 $\omega_c=200～250$rad/s，外环截止频率 $\omega_n=20～25$rad/s。为进一步提高控制性能，在系统中附加有电流断续自适应回路，用以改善在空载和小电流情况下晶闸管回路放大倍数和时间常数变化的影响。电流环内的电动势用以记忆在电流切换前的触发角，以保证切换完成后变换器所提供的逆变电压和电动机电动势相适应，可减少电流换向死区时间和提高可靠性。此外，速度环内的磁通自适应和电动势环内的速度自适应，用以补偿在弱磁条件下主传动电动机积分时间常数和转速变化的影响。在咬钢和突加负载条件下，为了尽可能地减小转速波动，除提高开环增益和外环截止频率外，还采用前馈控制方式，即通过某些观测的方法获得主传动电动机轧制力矩信号（见图 2），然后前馈至电流环输入端，增大咬钢瞬间电流波形前沿陡度，可减少动态速降。

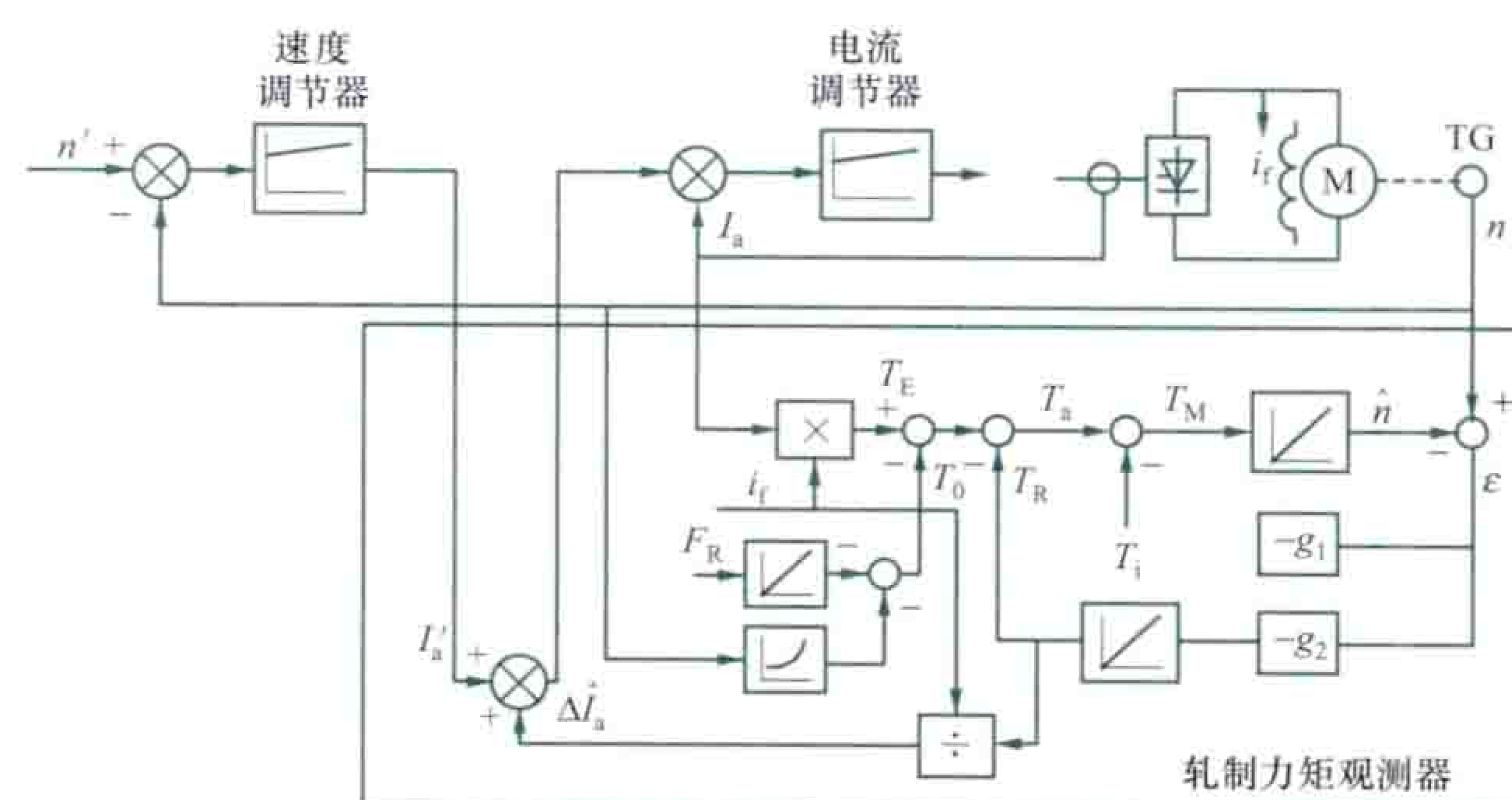


图 2　精轧机电控系统框图

i_f—主电动机励磁电流；I_a—主电动机电枢电流；n—主电动机实际转速；F_R—轧制压力；n'—主电动机转速设定值；T_E—主电动机电磁力矩；T_0—空载及摩擦力矩；T_a—加速力矩；T_R—轧制力矩观测值；$\Delta\hat{I}_a$—相应轧制力矩的电流观测值；$\hat{n}$—转速观测值；T_M—主电动机积分时间系数；g_1、g_2、T_i—观察器动态增益及时间常数

活套机构设于精轧机组的每两个机架之间，用以张紧机架之间的带钢，由于经常处于低速堵转状态，应选用力矩电动机。因为力矩不反向，可采用单向不可逆晶闸管变流器供电，电流及转速双闭环控制。轧制过程包括张力和高度控制。张力控制是根据不同钢带的张力大小计算不同摆角时的张力力矩，并作为电流设定值至电流控制系统，通过调节电流维持张力恒定。高度控制是根据摆角传感器检测的摆杆实际位置，与给定值比较产生偏差，通过高度调节器按确定比例修正本架及上下游各架轧辊速度设定值，以维持轧制过程活套高度恒定。

压下装置用液压或电动方式驱动，通过压下螺丝上下移动轧机上轧辊以取得不同的轧件厚度。在电动压下装置中左右两个压下螺丝由两台直流电动机单独传动。或者通过装在轴上的电磁离合器使两个螺丝联动。电动机用可逆变流器供电，除通常的闭环控制外，还通过压下的位置传感器组成模拟式或数字式的位置控制（APC）。自动厚度控制（AGC）主要用以补偿轧件由于温度变化或入口厚度变化所引起的成品厚度偏差。基本工作原理是，根据事先实测各机座弹性变形系数 m、轧制过程检测的辊缝实际值 s 及轧制压力实际值 F，计算出口厚度值

$$h=s+\frac{F}{m}$$

当产生偏差时，通过驱动机构修正辊缝值 s 消除厚差。实际上由于传感器精度和其他外界因素（如轧辊偏心）的影响，用间接测厚公式检测钢材绝对厚度的方法精度不高，在要求保持带钢沿长度方向头尾厚度均匀的场所，通常采用头部锁定法，即把各架头部的厚度作为该架厚度的设定值，然后利用间接测厚公式计算厚度对头部锁定的偏差值。由于这种头部锁定间接测厚的 AGC 系统简单、无时滞，已为大量轧机所采用，其系统框图如图 3 所示。有些轧机还加有前馈控制 AGC 和 X 射线测厚监控 AGC。前馈控制 AGC 主要是通过测得的上一架出口厚度偏差，经过延时事先修正下一架辊缝设定值以消除厚差，这样可避免反馈控制 AGC 中由于系统惯性造成的调节过程中的厚度不均，以提高成品厚度合格率；X 射线测厚监控 AGC 通过设在精轧后的 X 射线测厚仪检测实际厚度，并修正和监控精轧各架的辊缝设定值，使各架出口的厚度更接近头部锁定或规格要求的目标值。

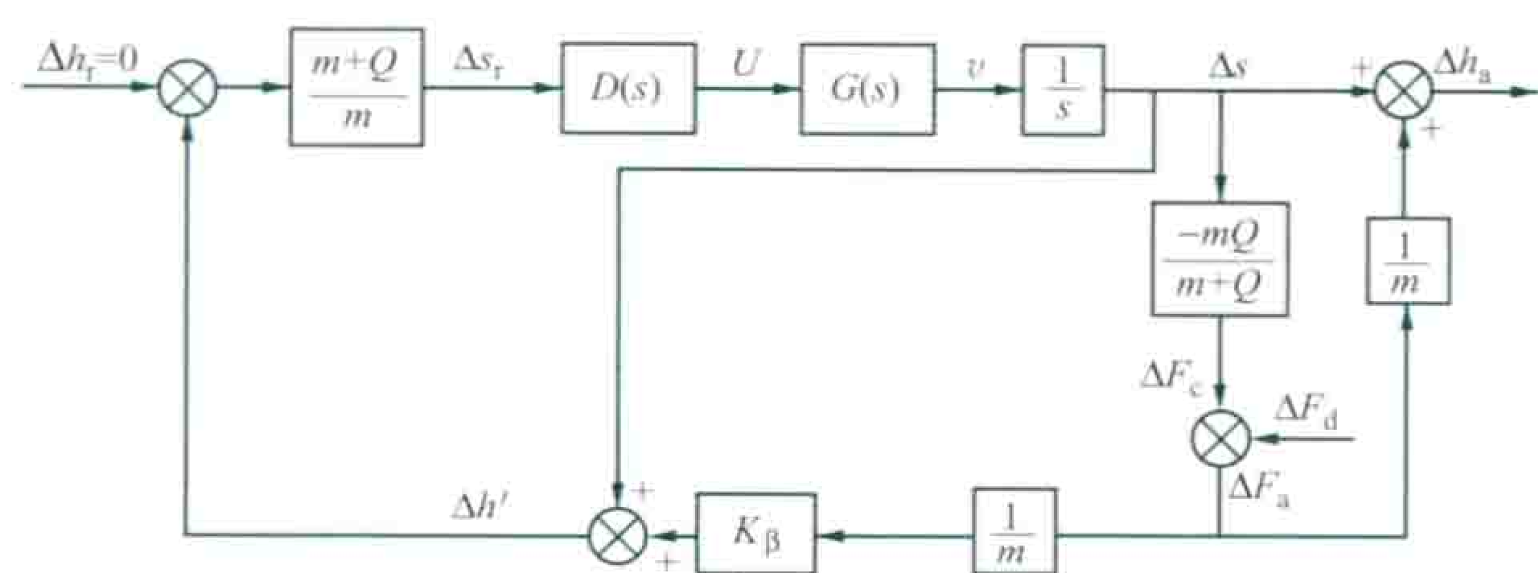


图 3　间接测厚自动厚度控制系统框图

Δh_r—给定的厚度偏差，令 $\Delta h_r=0$；Δh_a—实际的厚度偏差；$\Delta h'$—间接测厚得到的出口厚度偏差；Δs_r—需要的轧辊位移；Δs—实际的轧辊位移；ΔF_c—轧辊位移产生的轧制力变化；ΔF_d—外界干扰引起的轧制力变化；U—压下调速系统修正信号；v—轧辊位移速度；m—轧机弹性变形系数；Q—材料塑性变形系数；$D(s)$—校正环节传递函数；$G(s)$—压下转速系统传递函数

卷取机和其他辅助传动电控系统　每台卷取机的卷筒，由单台直流电动机传动，可逆晶闸管变流器供电。卷取时随卷径加大降低卷筒转速，维持线速度和张力恒定。控制系统采用转速-电流双闭环和非独立弱磁控制（见直流电动机调压调磁调速），类似于通常的直流调速系统。外环转速反馈设定值取自精轧末架测速发电机输出电压（正比于带钢线速度），以保证在头部咬入及加速卷取时卷筒和精轧机组同步，并且兼用于卷筒冲动和断带时的速度保护。内环电流环用以调节卷取时的张力，通常在头部咬入和建立张力后速度调节器饱和，其输出限幅值作为电枢电流设定值供电流调节系统。张力调节器按一定的控制原则（如最大力矩原则）随卷径和磁通改变电流设定值（即速度调节器输出限幅值），以维持恒定卷取张力。按照运动方程，电动机电磁力矩为

$$T_E=\frac{D}{2k}F+T_0+T_a+T_b=C_M\Phi I_a$$

式中 F 为卷取张力；T_0 为空载及摩擦力矩；T_a 为加速力矩；T_b 为板材弯曲变形力矩，在热轧卷取机中，特别是厚板卷取时该项不能忽略；k 为机械减速比；C_M、Φ、I_a 分别为转矩常数、每极磁通和电枢电流。实现张力不变的条件是，电枢电流随卷径和磁通按 $I_a\propto\frac{D}{\Phi}$ 变化，然后再适当加入 T_0、T_a、T_b 对应的电枢电流分量。磁通信号 Φ 可通过检测励磁电流和磁通模拟曲线取得；卷径信号 D 通常通过检测钢板线速度（速度设定值）v_1 和卷筒转速（卷筒测速机输出电压）v_n，通过“卷径记忆”装置计算钢卷直径 $\left(D=\frac{v_1}{v_n}\right)$ 间接取得。

热连轧机的辊道，可采用可逆晶闸管变流器作为电源的分段母线供电。根据工艺和调速需要，一台可逆变流器可为数台或数十台辊道电动机供电，控制系统一般是电压（或转速）反馈的双闭环系统，接于公共供电母线上的每台辊道电动机还设有单独的过载短路保护。中间辊道即粗轧末架至精轧前辊道以及精轧末架至卷取机前的输出辊道，为实现速度同步或终轧及卷取的自动温度控制，须有较高的调速要求。同时辊道很长，又采用单独传动，辊道电动机台数多，环境恶劣，但维修方便。一般常采用交流电动机传动变频电源供电。对于变频电源可采用交流变频发电机组通过调节交流发电机原动机转速实现调频；或者采用交流-交流直接变频调速或交流-直流-交流变频调速。其中中间辊道速度较低，频率变化范围通常在 17Hz 以内，采用晶闸管交流-交流变频装置供电；输出辊道速度较高，频率变化范围最高达 70Hz，采用新型自关断元件的脉宽调制系统。

计算机控制系统　随着微电子和计算机技术的发展，轧机计算机控制日趋完善且发展迅速。控制范围从加热炉板坯库至卷取机钢卷运输链全线，主要包括炉区控制、粗轧区控制、精轧区控制和卷取机控制。炉区范围内，由计算机确定每个钢坯所应装入的加热炉，按照装入板坯的宽度自动确定推钢机工作行程并监视推钢机的定位和工作顺序，以传感器配合实现炉内板坯跟踪及按程序确定加热炉的出料顺序；粗轧区范围内，计算机对粗轧各架的辊缝、轧速、立辊侧压开度等实行自动预设定控制（APC）及可逆机架程序控制、出口机架最小张力控制等；精轧区范围内，对精轧各架辊缝、轧速、侧导板、开度等实行自动预设定控制、终轧温度控制和确定轧制加速度、自动厚度控制、张力和活套高度控制等；卷取区范围内，对卷取机速度张力及夹送辊、助卷辊开度等实行自动预设定控制，设定输出辊道各段速度，并根据温控模型和实测轧线上的温度选择设在辊道上冷却水喷嘴的段数和个数，实现卷取温度控制（ATC）。此外，在水平较高的计算机系统中还有轧制节奏和板坯跟踪的图像显示以及全厂合同处理等生产控制和管理的部分功能。为实现上述功能，热连轧机的计算机电控系统多采用分级分散系统。

根据自动化程度和生产要求，轧机可分成生产管理、生

产控制、过程控制以及基础自动化四级。生产管理级通常采用1～2台通用计算机执行合同管理、编制生产计划；生产控制级采用1～2台小型计算机执行物料跟踪及制订轧制计划；过程控制级一般采用3～4台多位微型计算机执行设定计算及生产过程的自适应最优化控制等；基础自动化级可由数台多位微型计算机及可编程序控制器组成，主要执行各种逻辑和直接数字控制。

随着轧机生产能力的不断提高，对其提出更加高速、高质、高效的要求，热连轧机的传动及自动化程度亦不断发展提高。控制回路和自动化系统采用各种型号的微型计算机和可编程序控制器，利用丰富的计算机软件取代旧式的控制器，实现更为复杂的控制并有利于硬件生产的标准化。随着大功率变流技术和微机控制系统的不断发展和完善，在轧机主传动和主要副传动系统中采用各种晶体管变流器和交流电动机，已经逐步取代传统直流电动机。

resuo dianlan jietou

热缩电缆接头 (thermal shrinkable cable joint) 用高分子聚合物的基料加工成绝缘管、应力管等在现场经装配加热紧缩在电缆绝缘线芯上的一种电缆附件。包括热缩电缆终端和中间接头，一般用于35kV及以下挤包绝缘电缆线路。

高分子聚合物在选定温度下，通过辐照交联，产生了能保持在这个温度时的几何形状，其后只需再经加热，又能自由复原到选定温度时的形态，即为弹性记忆功能。在安装热缩电缆接头时，利用制成具有弹性记忆功能的热缩部件套上电缆芯，用丙烷枪或喷灯加热，使这些部件受热后紧缩在电缆端头上，代替传统电缆终端的瓷套管、电缆胶、底盘和外壳等笨重部件，因此，热缩电缆接头轻巧紧凑，工艺简单省时。

热缩电缆接头的主要部件有应力管、抗电炭痕管、三叉手套、伞裙、绝缘管和导体连接管等。

应力管　用热缩材料制成的能缓和电缆屏蔽末端电场应力集中的管材。

抗电炭痕管　用分子键牢固的高分子聚合物材料做成的管子（如硅橡胶管），代替电缆终端中传统的瓷套管。抗电炭痕管两端内壁涂有黏结剂，以便密封。高分子聚合物用作电缆终端表面时，在潮湿的空气中带有漏电电流，在湿度不大时，表面局部被电流烤干，形成绝缘较高的干领圈，承受了全电压，促使干领圈局部放电，电离后的臭氧夺取了碳氢聚合物的氢原子、残留碳原子，使管子表面形成炭化树枝状通路，最后导致击穿。因此，具有分子键结构牢固性能的抗电炭痕聚合物是热缩终端的重要材料。

三叉手套　用在三芯电缆的热缩终端中，防止雨水从三根绝缘线芯的空隙处进入电缆内，兼有绝缘线芯分开处护套作用的手套状部件。

伞裙　为了增加电缆终端表面的泄漏距离，用分子键结构牢固的抗电炭痕聚合物压制成可热收缩的伞裙，按环境和电压不同，在电缆终端上套上一定个数的伞裙，收缩在抗电炭痕管上。

绝缘管　用热缩材料制成的具有绝缘性能和防水性能的管材。

导体连接管　电缆的导体之间通常用相当于导体外径4倍长的连接管连接，连接管的截面积等效于导体的截面积。（见配电电缆接头）

renti chudian

人体触电 (shock on the human body) 人体直接接触电气设备的带电部分时电流通过人体的现象，又称触电。发生触电时，人体中流过的电流引起人体病理、生理效应，造成伤害，甚至危及生命。人体触及带电体能否造成伤害和造成伤害的程度，主要取决于电流通过人体的效应。电流大小不同，引起人体生理、病理效应也不同。

1974年，国际电工委员会（IEC）以IEC 479号文发布《电流通过人体的效应》，这是众多研究成果中具有代表性、权威性的成果，是研究触电安全技术、制定安全防护标准及设计医用等有关电气设备的基本依据之一。中国已采用这项标准。

触电类别　按对人体伤害的不同主要有电击和电伤两类。

电击　电流通过人体时对内部器官的伤害。人体遭受电击后，引起的主要病理变化是心室纤维性颤动、心脏麻痹及呼吸中枢衰竭等。这是触电事故中最严重的，绝大部分触电死亡事故都是由电击造成的。

电伤　发生电气事故时，电气设备与人体间产生电弧对人体皮肤的局部伤害，包括烧（灼）伤、电烙印（又称电斑痕）和金属溅伤等。电烙印指人体与带电体接触的部位皮肤变硬，形成灰色、黄色肿块，并与所接触的带电体形状相一致，这是低压触电时常见的现象。电伤在不是很严重的情况下，一般无生命危险。

触电伤害　分为热性质、化学性质、辐射性质和生理性质的触电伤害。①热性质触电伤害。电流通过人体时，因人体有电阻，产生热效应，造成烧（灼）伤或局部出现炭化。②化学性质触电伤害。电流通过人体时产生化学效应，引起人体内部组织发生电解现象，造成电烙印或皮肤金属化，严重时会引起人体机能失常。③辐射性质触电伤害。由于磁场能量对人体的辐射作用，导致头晕、乏力和神经衰弱等不适。④生理性质触电伤害。电流通过人体内部时的强烈刺激，使人体内部组织的正常机能受到破坏，发生肌肉收缩，引起心室颤动或窒息等生理病变。

电流对人体的伤害程度与通过人体电流的大小、持续时间，通过人体的途径和电流（频率）的种类，人体的电阻及人体的健康状况等因素有关。

根据IEC的统计资料（IEC479-1与IEC479-2），不同的电流对人体的影响不同。图1所示为15～100Hz交流电流流过人体时的电流-时间效应分区图。图中a、b、c1三条主要曲线将电流对人体的不同效应分成4个区。区①为无反应区；区②为无有害的生理性病变反应区；区③为对人体无危险，但可能出现病理生理反应区，如呼吸困难、肌肉收缩、血压升高、心脏电刺激；区④除有区③的效应外，还可能出现心室纤维颤动。由曲线c1向右，发生心室纤维颤动的概率逐渐增大。曲线c1与c2间有5%的人出现心室纤维颤动，曲线c2与c3间增加到50%，曲线c3再向右侧超过50%。随着人体电流和持续时间的增加将会出现心脏停跳、

呼吸停止和严重烧伤等后果。图1中发生心室纤维颤动的效应区仅适用于电流从左手到双脚流过的情况，其他电流路径引起的心室纤维颤动效应采用心电流系数进行换算。IEC给出了不同人体电流路径的心电流系数，见表。

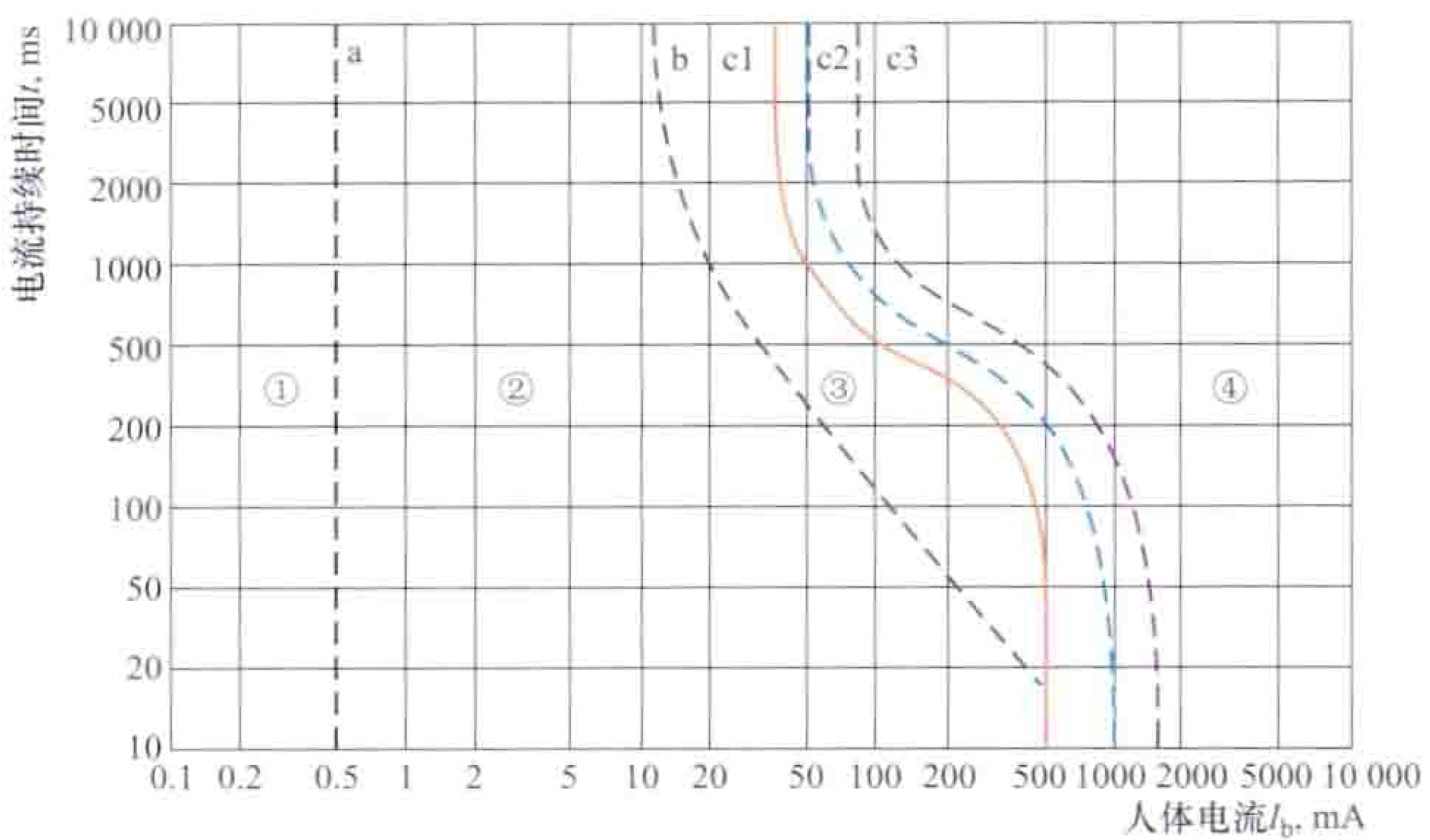


图1 15～100Hz交流电流流过人体时的电流-时间效应分区

不同人体电流路径的心电流系数

电流路径	心电流系数	电流路径	心电流系数
左手到左脚、右脚或双脚	1	从背到左手	0.7
双手到脚	1	从胸到右手	1.3
左手到右手	0.4	从胸到左手	1.5
右手到左脚、右脚或脚	0.8	从臀部到左手、右手或双手	0.7
从背到右手	0.3		

IEC提供了如图2所示的人体能承受的电压与时间的安全界限。在交流50V时可承受的时间为5s，50V以下时不做规定。图1、图2和表为制定触电防护标准，设计和选择触及或探入人体的电气设备的电气参数提供了理论依据。很多国家为保护人身触电的安全，规定的安全临界值为30mA·s。

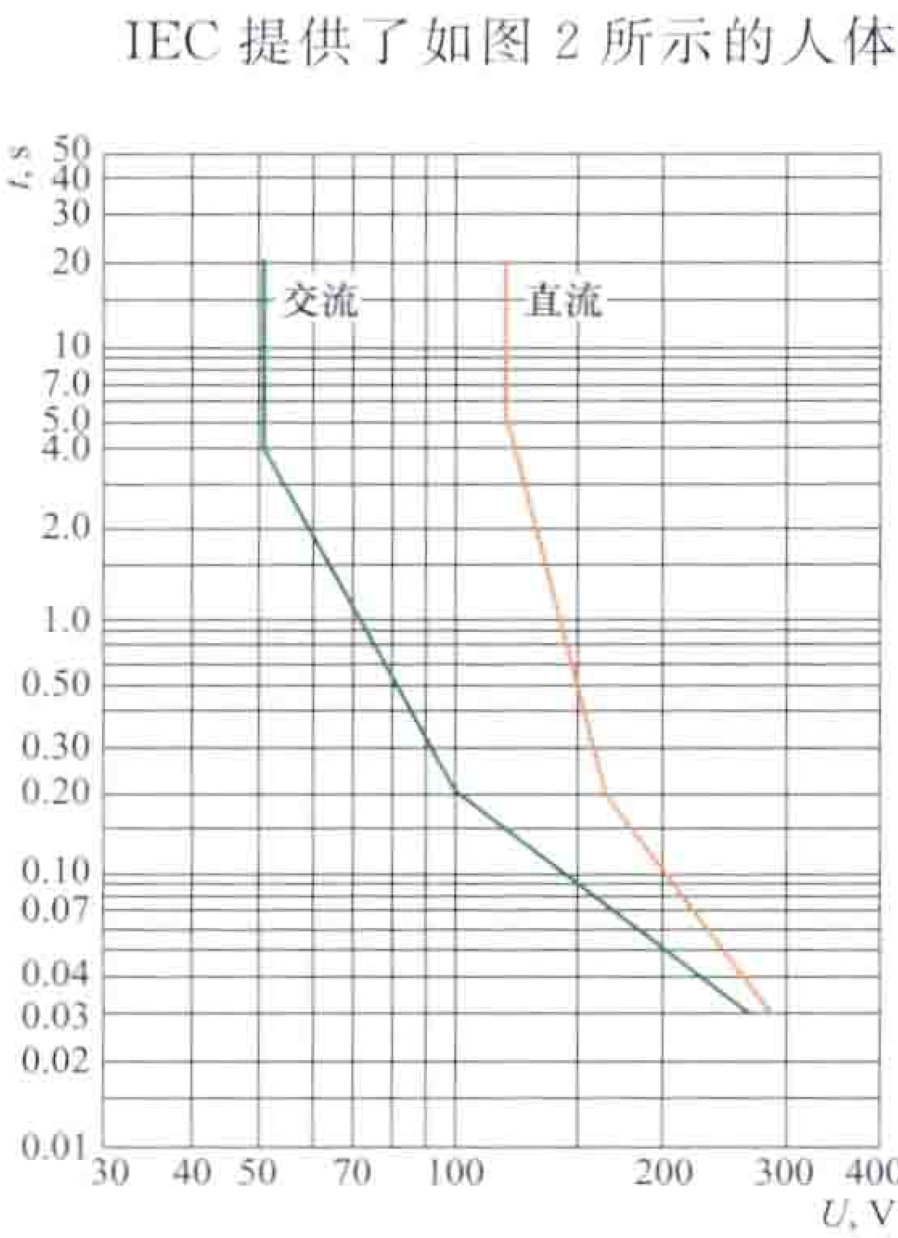


图2 人体能承受的电压与时间的安全界限

直流电流对人体的效应，IEC也给出了效应分区图，见图3。曲线a、b、c将不同效应分成4个区。区①无生理反应；区②无有害的生理反应；区③不会出现器官损害，随人体电流和持续时间的增加，可能出现心脏冲动和传导的可逆性紊乱；区④可能出现心室纤维颤动，随人体电流和持续时间的增加除产生区③的反应外，可能会产生严重烧伤等其他生理病理反应。图3中区④是按从左手到双脚的人体电流路径，且为向上的电流效应给出的，若电流向下引起的心室颤动电流值则应乘以系数2。从手到手流过的横向电流不会引起心室纤维颤动。

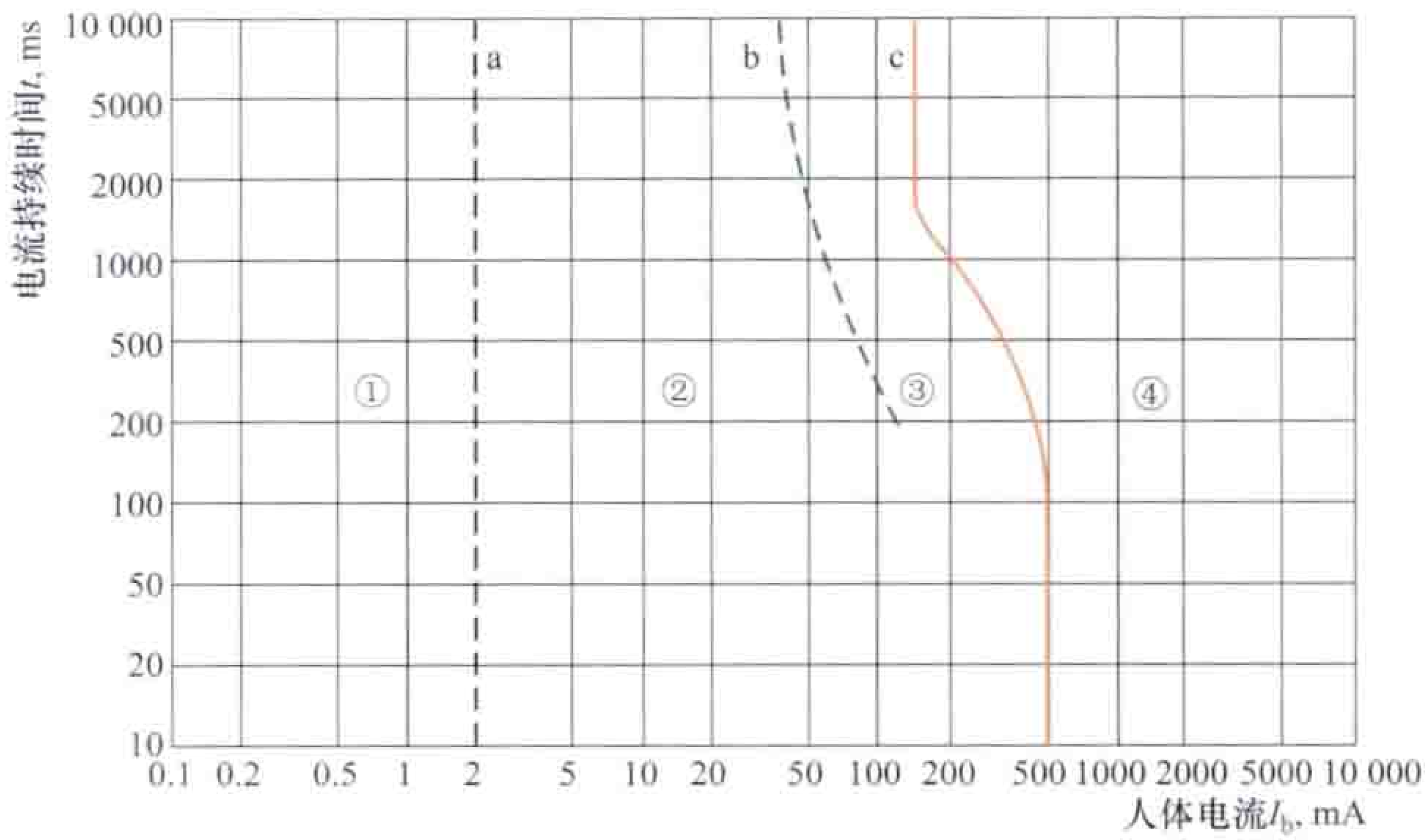


图3 流过人体的直流电流-持续时间效应分区

触电方式 常见的触电有直接触电、间接触电、感应电压触电、剩余电荷触电及雷电触电。

直接触电 人体直接触及带电体的触电。如触及带电的裸电线或电器的裸露部分。直接触电一般是由工作失误所致。

间接触电 人体触及在故障情况下才带电的物体。如电气设备的外壳和与之相连的金属构件，正常情况下不带电，但由于绝缘损坏、失效而漏电时则带电，人若触及就会触电。间接触电是由电气设备故障条件下的接触电压或跨步电压形成的。间接触电对人体的伤害程度取决于接触电压或跨步电压的大小。间接触电是无法预测的。

感应电压触电 人体承受感应电压或静电电压所造成的触电，又称静电触电。

剩余电荷触电 电气设备的相间和相对地间都存在着一定的电容，由于电容具有储存电荷的特性，因此在电源刚断开时设备上仍保留一定的电荷，即剩余电荷，如果此时人体触及这些设备，就会发生剩余电荷触电。

雷电触电 雷电是自然界的一种放电现象。当人体处于或靠近雷云对地或地面物体间的放电途径时会发生雷电触电。

防止触电措施 发生触电事故的原因主要是用电人员缺乏安全用电知识、违反操作规程以及电气设备漏电和年久失修等。针对事故发生原因采取相应的措施防止触电事故发生。

防止直接触电的措施有：①利用绝缘材料将带电部分全部包裹起来。②利用遮栏或外壳将带电部分与外部完全隔开。③设置阻挡物（如隔板等）、警告信号灯、警告信号标志。④保持安全距离。⑤使用安全电压。⑥遵守电业安全工作规程。进行电气工作时，应执行工作票制度、操作票制度、工作许可制度、工作监护制度、工作间断转移和终结制度；停电或部分停电工作时，必须依次进行停电、验电、装设接地线、悬挂标示牌和装设遮栏，然后再进行工作。⑦正确使用电气安全用具，并妥善保管、定期检查。

防止间接触电的措施有：①加强电气设备的绝缘（如双重绝缘），防止漏电；②正确选择保护接地形式，如采用保护接零、保护接地等；③采用自动切断供电的保护电器，如过电流动作保护器、剩余电流动作保护器；④采用电气隔离；⑤需接触电气设备时，有条件停电的，应先停电然后再

接触；⑥采用非导电场所。

发生触电事故时，应进行触电急救。首先应设法使触电者立即脱离电源，并根据触电者的具体情况，迅速组织现场救护工作，视触电者身体状况，确定护理和抢救方法。若出现神经麻痹、呼吸中断、心脏停跳等症状，迅速采用心肺复苏法（即通畅气道、口对口或口对鼻人工呼吸、胸外按压）进行抢救。同时，尽快通知医务部门做进一步处理。

rongduanqi

熔断器 （fuse） 当电流超过规定值并经一定时间后，以它本身产生的热量使一个或几个特殊设计的熔体熔断来分断电路的一种开关电器（见低压电器）。熔断器（见图1）由熔体、底座等部件组成。工作时，熔断器串联在被保护电路中，当电路发生短路或严重过载时，熔断器中的熔体将自动熔断，起到保护作用。熔断器具有体积小、使用方便以及价格低廉等优点，在低压配电系统、工矿企业的动力装置、仪器仪表、生活用电线路和电气设备中广泛用作保护器件。



图1　熔断器

熔体是电路中最薄弱的环节，当过负荷电流或短路电流通过熔体并经过一定时间，由于熔体的发热使自身的温度升高，温度上升到熔体材料的熔点时，熔体熔化并产生强烈电弧，电弧熄灭后电路即被分断，借以保护电路的过负荷或短路。由于最早的熔体是做成丝状的，故俗称保险丝。熔体的形状并不限于丝状，特别是在额定电流较大时，更多地采用变截面的片状金属。熔体的材料、尺寸和形状决定了其熔断特性。熔体材料分为低熔点和高熔点两类。低熔点材料如锡铅合金，其熔点低，容易熔断，由于其电阻率较大，故制成熔体的截面尺寸较大，熔断时产生的金属蒸气较多，只适用于低分断能力的熔断器。高熔点材料如铜、银等，其熔点高，不容易熔断，但其电阻率较低，可制成比低熔点熔体截面尺寸小的熔体，熔断时产生的金属蒸气少，适用于高分断能力的熔断器。改变截面的形状和尺寸可改变熔断器的熔断特性。

熔断器具有反时限特性，即过载电流小时，熔断时间长；过载电流大时，熔断时间短。不同的熔断器有不同的熔断特性曲线（见图2），以适用于不同类型保护对象的需要。

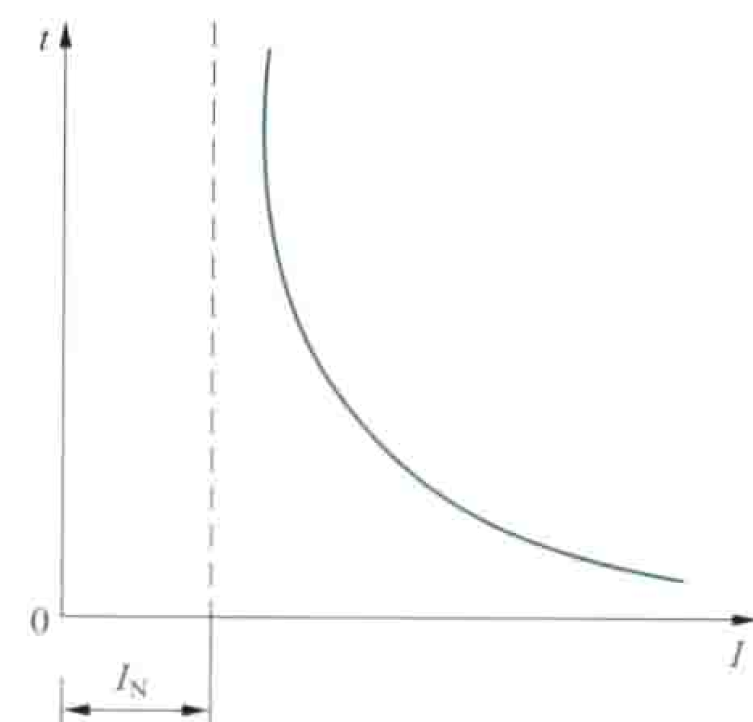


图2　熔断器的熔断特性曲线

低压熔断器按结构可分为开启式、无填料封闭管式、有填料封闭管式及自复熔断器。①开启式熔断器。图3所示的瓷插式熔断器属于开启式熔断器。其丝状熔体装在瓷插头上，熔体用铜丝或锡铅合金制成，熔体熔断后易于更换。这种形式熔断器的熔断特性不稳定，分断能力也较低。②无填料密闭管式熔断器。这种形式熔断器的熔体装在封闭的绝缘管内，有时在管子内壁衬有产气较多的材料，以增加熔体熔断时管内的压力来提高分断能力。③有填料密闭管式熔断器。图4所示为一种瓷管封闭式熔断器，其中熔体做成变截面的片状，额定电流大时可用多片并联，熔体装在瓷管内，管内填以石英砂。这种形式熔断器的分断能力较高，熔断特性较稳定，但只能一次性使用。④自复熔断器。外壳由奥氏体不锈钢制成，外壳中心埋有氧化铍（BeO）瓷心，不锈钢和瓷心之间填充玻璃体，起密封和坚固瓷心的作用。瓷心细孔内灌以金属钠作为熔体，活塞的背面空隙部分充有10～20MPa的氩气，以压紧金属钠。采用金属钠作熔体，在常温下具有高电导率。当电路发生短路故障时，短路电流产生高温使钠迅速汽化，气态钠呈现高阻态，从而限制了短路电流。当短路电流消失后，温度下降，金属钠恢复原来的良好导电性能。自复熔断器只能限制短路电流，不能真正分断电路。其优点是不必更换熔体，能重复使用。

图3　瓷插式熔断器

1—瓷外壳；2—石棉垫；3—触刀；4—瓷插头；5—熔丝

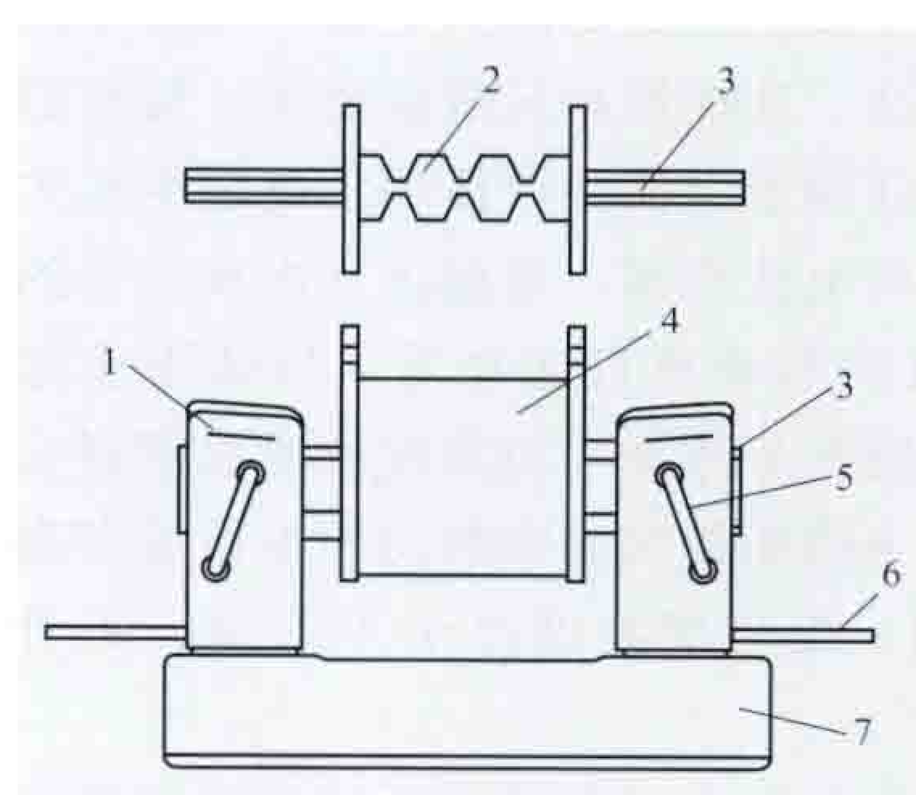
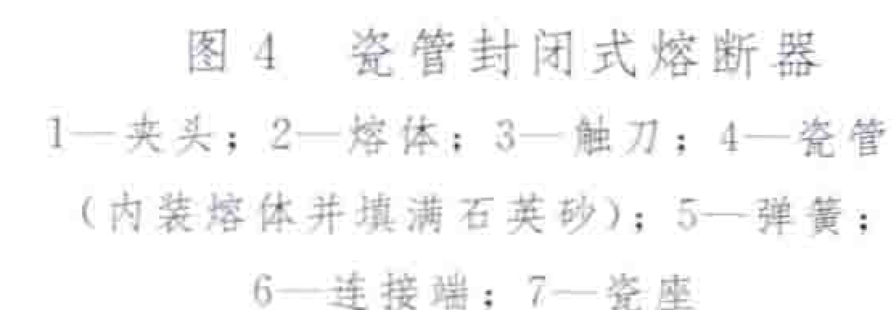



图4　瓷管封闭式熔断器

1—夹头；2—熔体；3—触刀；4—瓷管（内装熔体并填满石英砂）；5—弹簧；6—连接端；7—瓷座

熔断器按用途可分为一般用途、电动机用、半导体器件用以及其他特殊用途的熔断器。这些熔断器的保护特性有所不同。例如保护电动机的熔断器，在电动机正常起动且起动时间不超过规定时间时，熔断器不应熔断。又如保护半导体器件的熔断器，因半导体器件的过载能力差，出现过载时熔断器应能迅速熔断，故此种熔断器又称为快速熔断器。

rongduanqi baohu

熔断器保护 （fuse protection） 由熔断器实现的继电保护。主要用于配电变压器、分支配电线路、电容器、电动机等电气设备的短路保护和过载保护。熔断器是当电流超过规定值并经一定时间后，以它本身产生的热量使一个或几个特殊设计的熔体熔断，以分断电路的一种开关电器。熔断器结构简单、体积小、布置紧凑、使用方便、价格低廉、动作直接，选择性好、限流特性好、分断能力高。熔断器保护的主要缺点是：故障熔断后必须更换熔体，增加了停电时间；保护功能单一，只有一段过电流反时限特性；当只有一相熔断器熔断时，可能导致三相电动机缺相运行。实际应用中，熔断器常与负荷开关、过负荷保护配合使用。

熔断器的选择 选择熔断器时，应考虑环境条件和技术条件。环境条件是指环境温度、最大风速（对户外使用的熔断器有要求）、污秽情况（对户外使用的熔断器有要求）、海拔、地震烈度等，可参照户外开关设备的要求而定。技术条件包括正常工作条件（电压、电流）和保护特性（最大开断电流、最小开断电流、熔断特性等）两部分。

额定电压 表征熔断器绝缘所允许的电压等级和熔断器允许的灭弧电压等级。熔断器额定电压应按等于或大于设备或线路的额定电压选取，但以石英砂作为熔断器填充物的限流型熔断器只能按等于设备或线路的额定电压选择。

额定电流 包括熔断器额定电流、熔体额定电流。熔断器额定电流是指在一般环境温度下熔断器壳体的载流部分和接触部分允许通过的长期最大工作电流；熔体额定电流是指熔体允许长期通过而不至于发生熔断的最大电流。额定电流的选择应满足保护的可靠性、选择性和灵敏度要求。熔断器额定电流应大于或等于熔体额定电流。熔体额定电流应按大于保护设备或线路最大负荷电流选择，要保证在出现正常的短时过负荷时（如电动机的起动或自起动等）熔体不会熔断。选择额定电流时，还应充分考虑环境温度或者熔断器安装方式对其性能的影响。当熔断器安装在封闭的柜体或者套筒内时，应适当降容使用；当环境温度高于 40℃时，每升高 1℃，熔断器应降容 1%。

额定开断电流 在故障条件下可靠地开断过载或短路电流的幅值。额定开断电流应大于被保护设备最大短路电流，对限流型熔断器应大于次暂态电流幅值，对非限流型熔断器应大于稳态短路电流最大有效值。跌落式熔断器的开断能力应分别按上、下限值来验算。上限值按系统的最大运行方式验算，应不小于被保护设备的最大短路电流；下限值按系统的最小运行方式验算，应不大于被保护设备的最小短路电流。

保护特性 选择熔断器保护特性时，应保证前后两级熔断器之间，熔断器和电源侧及负荷侧继电保护之间动作的选择性。在本段保护范围内发生短路故障时，应在最短时间内切断故障。当电网安装有其他接地保护时，回路中最大接地电流和负荷电流之和不应超过熔断器最小熔断电流。所选择的熔体额定电流应保证电路中前后级保护动作时间的配合。

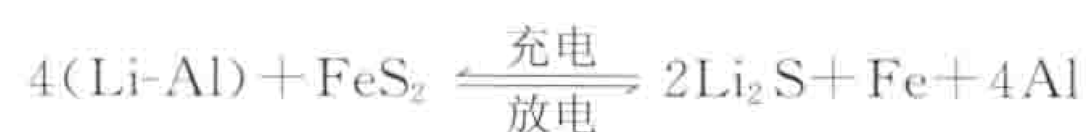
熔断器保护与负荷开关的配合使用 负荷开关主要用于开断和关合负荷电流，可以将负荷开关与高压熔断器配合使用，构成“负荷开关-熔断器组合电器”来代替断路器。高压熔断器带有撞击器，熔件熔断时撞击器会击出，撞击具有脱扣装置的负荷开关并使其三相开断。实际工程中熔断器多作为后备熔断器，其最小开断电流值为熔断器额定电流的 2.5～3 倍。当出现两相短路故障时，两故障相电流不一定相同，熔断器本身也存在一定的误差，不可避免地出现两相熔断器之间的熔断时间差。首相熔断器切除故障后，如果负荷开关不能及时断开，则会造成两相运行，对受电设备造成损害。当熔断器的熔体熔化时，负荷开关脱扣装置在撞击器操作下立即断开，可以解决缺相运行问题。如果发生三相短路故障，当首相熔断器动作、撞击器击出并触发具有脱扣装置的负荷开关断开时，另外一相或者两相熔断器可能尚未灭弧开断，必须由负荷开关负责切断其故障电流。所以，应根据负荷开关的固有分闸时间，结合熔断器的安秒特性选择确定负荷开关的开断电流。

熔断器保护与过负荷保护的配合 后备熔断器的最小开断电流值为熔断器额定电流的 2.5～3 倍，不具有过负荷保护能力；普通熔断器的最小开断电流值为熔体 1h 或稍长时间内的熔化电流，只具有部分过负荷保护能力。两者都需要用过负荷保护来弥补。全范围熔断器的最小开断电流值为熔体熔化电流，即便如此，它也需要变压器低压侧开关过负荷保护的配合，否则过负荷电流和持续时间可能超过受电设备的允许范围。

rongrongyan xudianchi

熔融盐蓄电池 （thermal battery） 以熔融盐为电解质的蓄电池。电池工作温度在 300～600℃之间，故又称高温电池。早期研究的熔融盐蓄电池是锂-硫族电池，而进展最快的是锂铝合金-硫化铁电池。这类电池的比能量高，可用较大的功率放电，用作汽车动力电池和储能电池。

锂铝合金-二硫化铁（Li-Al/FeS_2）电池的总反应为



$$4(\text{Li-Al})+FeS_2 \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} 2Li_2S+Fe+4Al$$

其平均电动势为 1.55V。

锂铝合金负极一般使用含 50%（摩尔）锂的锂铝合金粉末灌入兼作集流体的多孔金属结构中。正极所用二硫化铁的导电性低，需渗入铁粉或碳粉以增加其导电性能，用多孔石墨、多碳泡沫体、钼、钨等作集流体。电解质为 LiCl-KCl 共熔体，熔点为 352℃。隔板除起隔离正、负极，保持电解质的作用外，还要求在 450℃时有稳定性，能抗锂铝合金和二硫化铁的侵蚀，多用氧化钇石棉纸、氮化硼毡、氧化钇毡。

锂铝合金-二硫化铁蓄电池的比能量可达 174W·h/kg，比功率可达 248W/kg。



sanxiang dianya bupingheng

三相电压不平衡 (three-phase voltage unbalance)

三相交流电力系统中各相电压幅值和相位的不对称程度。电力系统三相电压不平衡程度是电能质量的主要指标之一，不平衡程度过大将引起一系列危害。电压不平衡主要是由三相负荷不对称引起的，电气化铁路、交流电弧炉、电焊机和单相负荷等都是三相不对称负荷。三相电压不平衡度通常用基波的负序分量（或零序分量）与正序分量的均方根值的百分比表示，即

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100\%$$

式中 ε_U 为三相电压不平衡度；U_1、U_2 为电压正序、负序分量均方根值，kV。

影响　三相电压不平衡的危害主要有：①引起旋转电机的附加发热和振动，影响其安全运行和正常出力；②引起以负序分量为起动信号的多种保护发生误动（特别是电网中存在谐波时），严重威胁电网安全运行；③发电机和变压器的容量利用率下降，换流设备产生附加的谐波电流；④变压器负荷较大的一相绕组过热，还会因磁路不平衡造成附加损耗；⑤对计算机和通信系统造成干扰，引起逻辑功能混乱、计算错误、控制失灵、测试结果失真、元器件受损等；⑥对照明和家用电器的安全、正常用电构成威胁，使其寿命缩短，不能正常使用。

标准　为减轻电力系统中三相电压不平衡造成的危害，GB 755—2008《旋转电机定额和性能》规定了旋转电机在电气设备额定工况下的电压允许不平衡度和负序电流允许值。GB/T 15543—2008《电能质量　三相电压不平衡》规定了三相电压不平衡的限值、计算、测量和取值方法，该标准适用于标称频率为50Hz的交流电力系统正常运行方式下由于负序基波分量引起的公共连接点的电压不平衡，以及低压系统由于零序基波分量引起的公共连接点的电压不平衡。规定：①电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为2%，短时不得超过4%；②每个用户电压不平衡的一般限值为1.3%。

改善措施　限制三相电压不平衡的主要措施有：①将不对称负荷分散接到不同的供电点，以免集中连接造成不平衡度严重超标；②使用交叉换相等方法使不对称负荷合理分配到各相，尽量使其平衡化；③将不对称负荷接到更高电压等级上供电，使连接点的短路容量足够大；④采用三相平衡化装置；⑤尽量使电力系统各相元件的参数相等。

sewen

色温 (colour temperature)　当光源的色品与某一温度下黑体的色品相同时，该黑体的绝对温度为此光源的色温（度），用符号 T_c 表示，单位为K。物理学中，以铁、钨等自绝对零度（－273℃）起始加温，把随着温度增高出现的颜色，每升高1℃时定为1K，加热至800K时便出现可见的暗红色，再由红热渐渐到白热，于是其色温也渐渐地升高，直至5600K时，即与日光相似，加热至25 000K时，将呈天蓝色。色温高，蓝光成分多；色温低，红光成分多。

日光光源色温的变化情况如下：

日出时的阳光	1850K
日出0.5h后的阳光	2380K
日出1h后的阳光	3500K
日出1.5h后的阳光	4000K
日出2h后的阳光	4400K
下午4时半的阳光	4750K
下午3时半的阳光	5000K
正午直射的阳光	5300～5600K

天空散射光中蓝色成分较多，其色温如下：

均匀的云遮日	6400～6900K
云雾弥漫的天空	7500～8400K
带有薄云的蓝天	13 000K
万里晴空的蓝天	19 000～25 000K

人造光源种类很多，常见的几种色温如下：

蜡烛的火焰	1850K
煤油灯	1900K
照相用强光灯	3400K
万次闪光灯	5300～6000K
钨丝白炽灯	2800～2900K
卤钨灯	3000～3200K
各种荧光灯	2700～6500K
金属卤化物灯	4500～6200K
高压钠灯	2900K
发光二极管灯	2000～20 000K
氙灯	5500～6000K

光源的色温与其实际的温度无关，例如，在色温为3400K的照相用强光灯泡上，蒙上一层浅蓝色透明纸，其色温会立即升高至4000K或更高，而改换一层浅黄色透明纸后，其色温会马上降低至2500K或更低。

电气照明的各种设施是从多种光源中选择色温最适当的光源加以利用。白炽灯的色温约在3000K或稍低些时，会产生温暖的感觉；昼光的色温约为6500K或高一些；光源色温在5000K以上，就会产生凉爽的感觉。由于人们爱好不同，对于光的颜色要求也不相同，一般情况下，照度低的地方希望色温低的光源，照度高的地方希望色温高的光源。GB 50034—2004《建筑照明设计标准》对应用于室内照明光源色温特征及适用场所做了规定，见表。

光源色温特征及适用场所

相关色温（K）	色温特征	适用场所
<3300	暖	客房、卧室、病房、酒吧
3300～5300	中间	办公室、教室、阅览室、商场、诊室、检验室、实验室、控制室、机加工车间、仪表装配室
>5300	冷	热加工车间、高照度场所

shanbian

闪变

（flicker） 见电压波动和闪变。

shanguangdeng

闪光灯

（photoflash lamp） 通过玻壳内发光物质的燃烧或机械电子控制方式能产生一个周期很短暂的强光输出的电光源。由于闪光灯能在很短的时间里发出像闪电一样很强的光，具有相当高的亮度，因此在摄影、频闪观测和航标信号等方面得到了广泛的应用。

闪光灯主要有燃烧式闪光灯、电子闪光灯、氙气闪光灯以及电子警用闪光灯。

燃烧式闪光灯 燃烧式闪光灯的结构和接线如图1所示。按下开关，电容器迅速通过钨丝放电。由于放电电流很大，钨丝很快达到白炽状态。在钨丝两端引燃剂的作用下，钨丝便在氧气中剧烈燃烧，以致发出耀眼的强光。

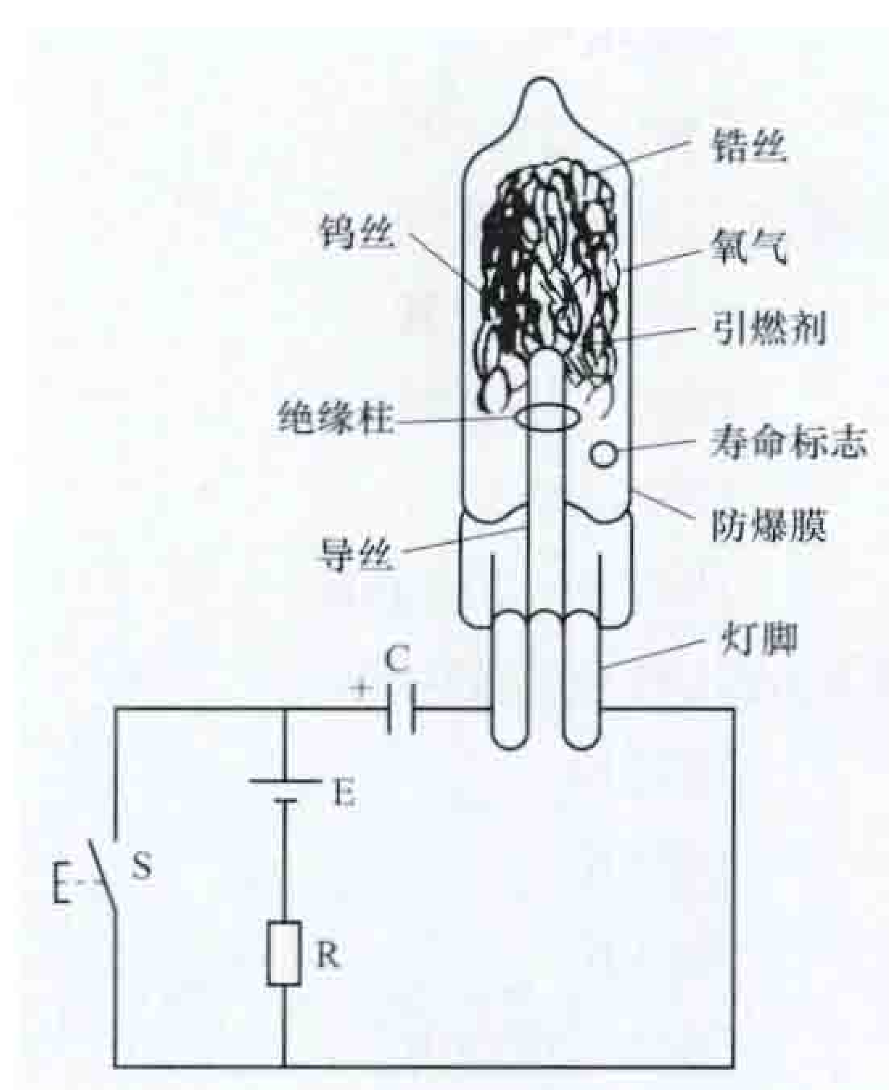


图1 燃烧式闪光灯的结构和接线图

为了防止玻壳炸裂和改善发光的颜色，在玻壳外表面涂敷不同颜色的合成树脂保护膜，如使用蓝色保护膜，可将灯的色温由3800K提高到6000K。当然，也可采用无色透明保护膜，但要配以相应的滤色片。

燃烧式闪光灯的类型很多，一般根据灯丝通过电流后发光材料发光时间的变化，可分为如表所示的MF、M、FP^{+}、FP和S型五种。闪光灯与照相机同步连接有软线连接和机械连接两种。闪光灯用干电池作电源的为B型，在干电池上并联电容器的为BC型。闪光灯与照相机用软线连接，按动相机快门，立即接通电源，闪光灯随即闪光。这种闪光灯是一次性的，所以又称单次闪光灯。由于灯的闪光亮度高、耗电量少、体积小、携带使用方便，可作为摄影光源，特别适用于农村、山区等无电地区。

闪光灯泡时间数据（ms）

类型	峰值时间	半峰值时间	有效时间
MF	13±3	8±3	约12
M	20±5	15±5	约15
FP^{+}		10±4	最低25
FP		15±6	最低25
S	30±3	20±3	约20

电子闪光灯 图2所示的万次电子闪光灯，玻壳通常用硬质玻璃做成，电极由芯柱和螺旋钨丝组成，并涂有电子粉，灯内充有氙气，电极与镍杆相连接，利用电子装置形成很高的电压迫使氙气电离后产生的电子由阴极趋向阳极而放电，发出很强的闪光。电子闪光灯的光色接近日光，适用于彩色摄影，发光时间约为1ms，可用来拍摄一般的动的和静的景物。若拍摄高速运动物体，还可采取措施，缩短闪光时间。由于灯的体积小、质量轻、供电简便，是新闻摄影中最常用的电光源。为了使闪光灯直接与照相机组合在一起，又开发了微型电子闪光灯，其工作原理和电子闪光灯一样，只是采用微型器件后，灯的结构更加紧凑，携带与使用都十分方便。

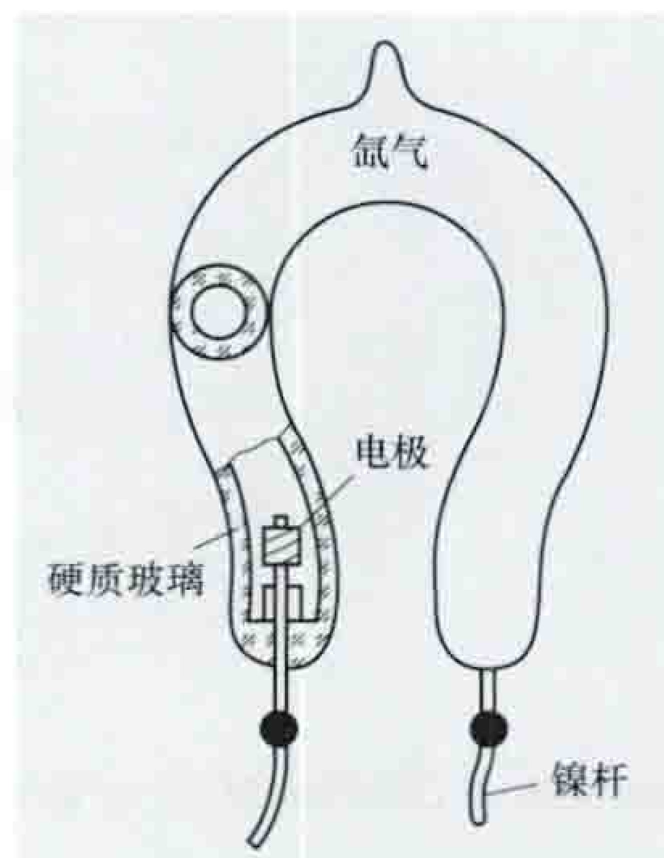


图2 SW-8型万次电子闪光灯

氙气闪光灯 又称脉冲氙灯。图3和图4所示分别为氙气闪光灯的工作线路和结构示意图。直流电源电压通过充电电阻将储能电容充电到工作电压。在脉冲氙灯管外绕有金属丝，灯工作时在金属丝上施加高压脉冲，使灯产生电离火花线，因火花线降低了灯的内阻，使电容中储存大量的能量在极短的时间里通过脉冲放出，产生很强的闪光，而且光色接近日光。灯的单次闪光次数高达5000～50 000次，平均使用寿命为100～200h，在航空闪光观察和演播室摄影等方面得到了广泛的应用。

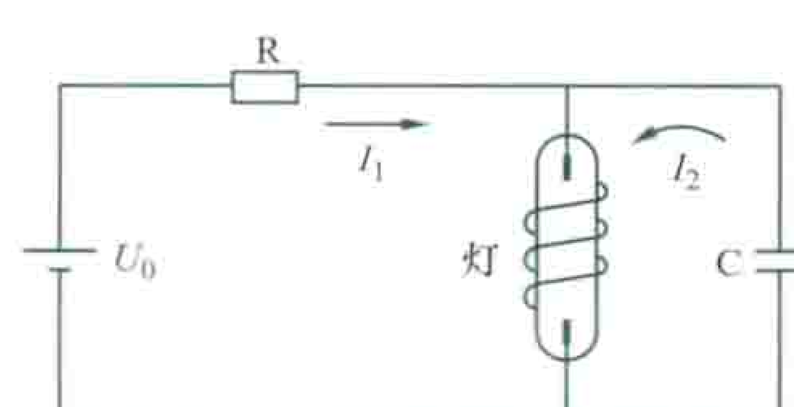


图3 氙气闪光灯的工作线路图

电子警用闪光灯 采用高亮度LED（发光二极管灯）光源，为各种抓拍系统开发的新型大功率高性能数字脉冲LED闪光灯。用于智能交通管理系统，如治安卡口、超速抓拍、闯红灯等电子警察的工作环境。采用独特的数字控制电路，具有回电快、寿命长、精确控制闪光时间，以及闪光瞬间内持续以大功率方波形式输出（功率密度大），大大提高相机曝光期内光输出能量等特点。通过调节闪光长度能够使发光与摄像机曝光时间达到最完美的结合，从而大大降低对人眼的影响和最大限度地减少环境光对拍照的干扰。能够满足在各种光线条件下，辅助摄像系统实现对车辆和驾驶员最清晰的拍照要求。其所采用的独特控制技术、产品的性能、安装方便性、寿命和价格均优于普通闪光灯。



图4 氙气闪光灯的结构示意图

shengwuzhi fadian

生物质发电

（biomass power generation） 将生物质的化学能变换成电能的技术。发电方式包括农林生物质直燃发电、生物质气化发电、垃圾焚烧发电、沼气发电、垃

圾填埋气发电和生物质燃料电池发电。除生物质燃料电池发电是将生物质中的化学能直接转化为电能外，其他生物质发电方式是将生物质中的化学能依次转化为热能、机械能，最后转化为电能。

生物质发电系统　包括生物质能转换装置、动力机械与发电机以及附属装置，生物质发电系统工艺流程如图所示。



生物质发电系统工艺流程图

（1）生物质能转换装置。实现生物质能向热能转换的装置，不同生物质发电方式的发电系统能量转换装置不同。农林生物质直燃发电中的能量转换装置是生物质锅炉，生物质燃烧产生热能。沼气发电、垃圾填埋气发电、生物质气化发电中的转换装置包括沼气池或发酵罐、生物质气化炉，将生物质转化为沼气、可燃气，再燃烧产生热能。

（2）动力机械与发电机。动力机械是与生物质能转换装置相配套的动力设备。秸秆、垃圾焚烧等直燃发电采用蒸汽轮机，沼气发电和生物质气化发电采用内燃机或燃气轮机。发电机用来将机械能转化为电能。

（3）附属装置。包括生物质预处理和输配装置、燃气和尾气净化装置等。

发展概况　20世纪70年代石油危机爆发后，各国开始研究新能源发电技术，一些国家如丹麦开始大力推行生物质发电，新建热电联产项目都以生物质为燃料，还将许多燃煤热电厂改建为生物质热电联产项目。2002年8月26日，可持续发展世界峰会在南非约翰内斯堡召开，会议通过了《约翰内斯堡可持续发展承诺》和《可持续发展世界首脑会议执行计划》。其中包括增加使用可再生能源，提高能源效率，更多地获得先进的能源技术等倡议，此后，生物质发电技术在全球迅速发展。到2005年底，全球生物质发电装机容量约5000万kW，主要集中在北欧和美国。之后，欧洲国家、美国、中国、印度和其他一些发展中国家的生物质用于发电的比例显著提高。截至2011年底，全球生物质发电装机容量达到7200万kW。

美国的生物质发电规模处于世界领先地位，2011年底，其总装机容量约1370万kW，以林业废弃物、农业废弃物和造纸黑液为燃料进行的热电联产为主，年发电量超过600亿kW·h。欧盟2011年生物质发电装机容量达2620万kW，发电量超过900亿kW·h，沼气发电装机容量约占生物质发电总装机容量的30%。德国的生物质发电装机容量2010年达到490万kW，年发电量287亿kW·h，此前10年间年平均增长速率超过22%，其中沼气年发电量128亿kW·h，装机容量230万kW。芬兰是利用林业废弃物、造纸废弃物等生物质发电最成功的国家之一，可制造具有世界先进水平的燃烧生物质的循环流化床锅炉，该炉型可燃烧生物质燃料的最高含水率可达60%，热效率达88%。2006年，芬兰生物质发电量占该国发电量的11%。瑞典于1993年率先建成世界首座生物质整体气化联合循环发电厂——韦纳穆生物质整体气化联合循环发电厂，该发电厂发电装机容量6MW，供热容量9MW，整体发电效率32%（自用电除外）。英国2012年生物质发电比例占可再生能源发电的37%，生物质发电量从2011年的130亿kW·h增长到2012年的152亿kW·h，增长率17%。巴西的生物质发电几乎全部来自热电联产，2011年底装机容量890万kW，主要以糖厂的甘蔗渣为燃料，该类机组装机占总容量的82%。印度2010年新增生物质发电装机容量约为30万kW，总装机容量达到300万kW。

中国早期的生物质发电项目主要是自主研制的蔗渣锅炉燃烧发电，以及利用木屑、稻壳的气化发电和一些小型的沼气发电。垃圾发电引进国外先进技术和设备在经济发达城市首先推广应用。自中国第一个垃圾焚烧发电厂——深圳市市政环卫综合处理厂于1988年在深圳投入运行后，中国已基本具备制造垃圾焚烧发电设备的能力。到2005年底，中国生物质发电装机容量为200万kW，其中蔗渣发电装机容量170万kW，垃圾焚烧发电装机容量20万kW，其余为稻壳等农林废弃物气化发电和沼气发电等。2006年《中华人民共和国可再生能源法》实施后，中国生物质发电产业迅速发展，主要是引进、消化和吸收欧洲秸秆直接燃烧发电技术，同时自主研发生物质气化发电、沼气发电等技术。截至2012年底，中国生物质发电累计核准容量达8781MW，其中并网容量5879MW，在建容量2902MW。

shengyu dianliu dongzuo baohuqi

剩余电流动作保护器　(residual current operated protective devices)　在规定的条件下，当剩余电流达到或超过基准值时，能断开被保护电路，或输出机械触点开闭信号或发出报警信号的机械电器或组合电器，简称剩余电流保护器，又称为漏电保护器、漏电开关。剩余电流动作保护器（见图1）广泛使用在低压电网中，用来防止人体触电、电气火灾及因接地故障引起的人身伤害及电气设备损坏事故。剩余动作电流小于0.03A、动作时间小于0.1s，且在250mA时动作时间小于0.04s的保护器，可以用作直接接触电击的补充保护，其他动作特性的保护器用作电气火灾防护或间接接触电击保护。装设剩余电流动作保护器后，仍应以预防为主，并同时采取其他各项防止人体触电和电气设备损坏事故的技术措施。



图1　剩余电流动作保护器

工作原理　剩余电流动作保护器包括检测元件（剩余电流互感器）、判别元件（剩余电流脱扣器）、执行元件（机械开关电器或报警装置）、试验装置和电子信号放大器（仅电子式剩余电流保护器有）等部分，如图2所示。

正常情况下，剩余电流动作保护器所控制的电路中没有发生触电、漏电或接地故障，此时通过剩余电流互感器一次

回路的电流矢量和等于零，即

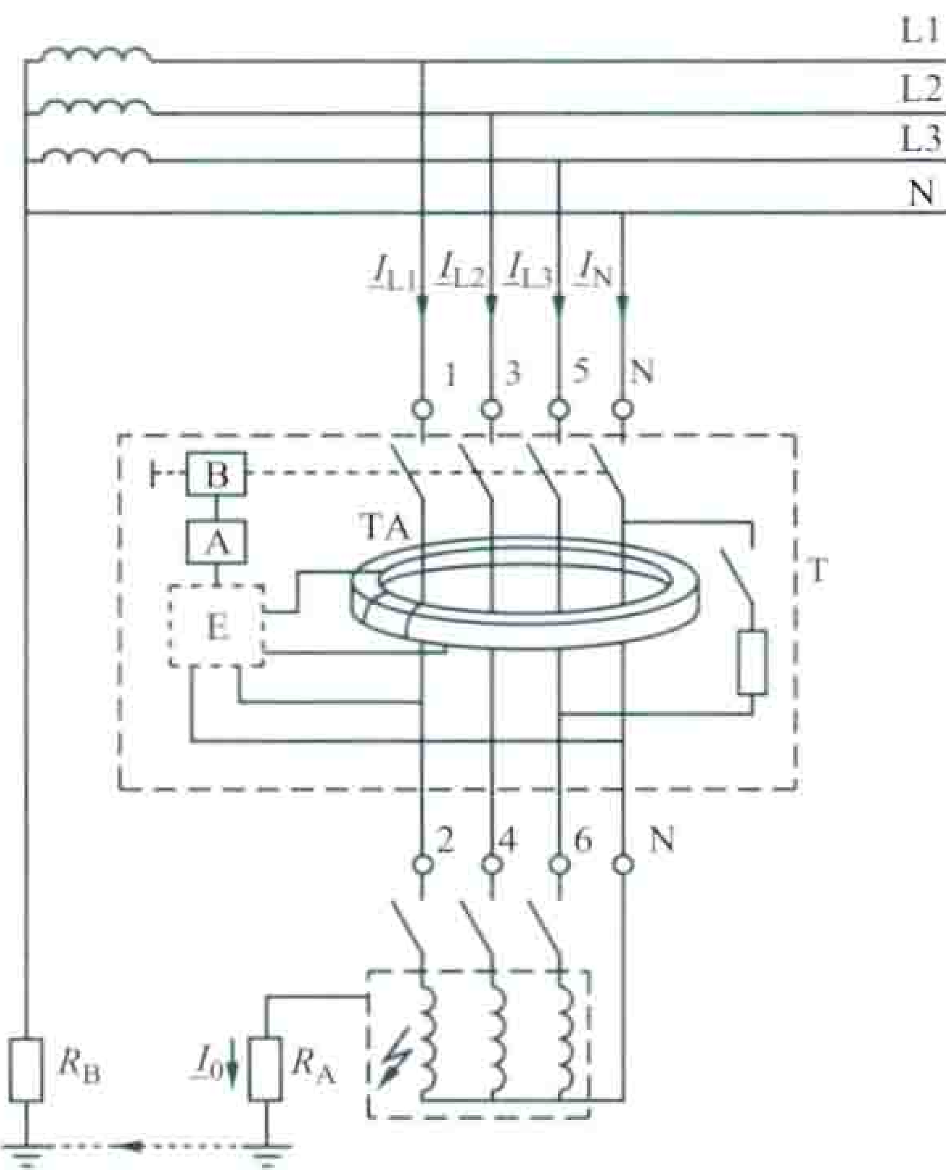


图 2　剩余电流保护电器的工作原理图

A—判别元件；B—执行元件；E—电子信号放大器；R_A—工作接地的接地电阻；R_B—电源接地的接地电阻；T—试验装置；TA—剩余电流互感器

$$\underline{I}_{L1}+\underline{I}_{L2}+\underline{I}_{L3}+\underline{I}_N=0$$

故电流 $\underline{I}_{L1}$、$\underline{I}_{L2}$、$\underline{I}_{L3}$ 和 $\underline{I}_N$ 在电流互感器铁芯中产生的磁通的矢量和也为零，即

$$\underline{\Phi}_{L1}+\underline{\Phi}_{L2}+\underline{\Phi}_{L3}+\underline{\Phi}_N=0$$

这样在电流互感器的二次侧没有感应电压输出。

当电路中发生设备漏电、有人触电等接地故障时，通过设备接地电阻 R_A 有一个接地电流 I_0 流过，这时通过剩余电流互感器的电流矢量和不等于零，为

$$\underline{I}_{L1}+\underline{I}_{L2}+\underline{I}_{L3}+\underline{I}_N=\underline{I}_0$$

剩余电流互感器铁芯中产生的磁通的矢量和也不等于零，为

$$\underline{\Phi}_{L1}+\underline{\Phi}_{L2}+\underline{\Phi}_{L3}+\underline{\Phi}_N=\underline{\Phi}_0$$

剩余电流互感器二次回路有感应电压输出，此电压直接或通过一个电子信号放大器施加在剩余电流脱扣器的脱扣线圈上，产生一个工作电流。二次回路的感应电压输出随着故障电流的增大而增大，当接地故障电流达到额定值时，脱扣线圈中的电流足以推动脱扣机构动作，使主开关断开电路或使报警装置发出报警信号。

分类　按动作功能与电源电压的相关性分为电磁式（与电源电压无关）和电子式（与电源电压有关）；按极数和电流回路数分为单极二线式、二极二线式、二极三线式、三极三线式、三极四线式、四极四线式；按额定剩余电流的可调性分不可调式和可调式；按动作延时特性分为非延时型和延时型；按直流分量情况分为 AC 型、A 型、B 型。AC 型保护器只在交流剩余电流时能正确动作，A 型保护器在交流剩余电流和脉动直流剩余电流时都能正确动作，B 型保护器在剩余正弦交流电流、剩余脉动直流电流和平滑直流电流时均能正确动作。

北美、日本等国家和地区主要使用电子式剩余电流动作保护器。电子式和电磁式在中国都有应用，其中电子式较多，占 80%以上。电磁式和电子式剩余电流动作保护器特点比较见表。

电磁式和电子式剩余电流动作保护器特点比较

项　目	电磁式剩余电流动作保护器	电子式剩余电流动作保护器
辅助电源	不需要	需要
电压波动对特性的影响	无	有（采取稳压措施可减少影响）
电压故障时工作状况	不受影响	电源故障时不能动作（电压跌落或电源线断开）
温度对特性的影响	很小	有（有温度补偿措施可减少影响）
绝缘耐压能力	强	弱
耐过电压能力	强	弱（有过电压保护器可提高耐过电压能力）
外界电磁场的影响	抗电磁干扰性能好	抗电磁干扰性能差（电子电路中采用抗干扰措施可减少影响）
结构	较复杂	简单
工艺要求	高	低
接线要求	进出线可反接	进出线不能反接（电子回路有断开装置可反接）
电流等级	大额定电流等级制造困难，一般在 125A 以下	大额定电流等级制造方便。配电装置用的剩余电流保护器额定电流较大
剩余动作电流	一般大于等于 10mA	可以制成高灵敏度的，剩余动作电流为 6mA
制造成本	较高	较低
派生功能	只能制成快速动作型或 S 型（不驱动时间 0.06s）	可派生延时、预报警、故障报警、显示等多种功能
耐冲击振动性能	受到一定的限制	较好
安装规程	不受限制	欧洲及澳洲有些国家限制非专业人员使用电子式剩余电流动作保护器

应用场合　①以末端保护为基础。必须安装剩余电流动作保护器的设备和场所包括：属于Ⅰ类的移动式电气设备及手持式电动工具；生产用的电气设备；施工工地的电气机械设备；安装在户外的电气装置；临时用电的电气设备；机关、学校、宾馆、饭店、企事业单位和住宅等除壁挂式空调电源插座外的其他电源插座或插座回路；游泳池、喷水池、浴池的电气设备；安装在水中的供电线路和设备；医院中可能直接接触人体的电气医用设备；其他需要安装剩余电流动作保护器的场所。②作为企事业单位、公共场所、住宅等建筑物电气线路的分级保护。在总电源端、分支线首端或线路末端安装剩余电流动作保护器。电源端的第一级剩余电流动作保护器应满足防接地故障引起电气火灾和间接接触电击保护的要求，线路末端的剩余电流动作保护器应满足直接接触保护的要求。③作为农村电网电气线路的分级保护。第一级保护（配电变压器低压侧总保护或各条低压出线的保护）主要考虑架空线路的接地故障保护，第二级保护主要作为分支线或农村集中安装电表箱、农业生产设备的电源配电箱后面线路的电气火灾保护和接地故障保护，末端保护包括居民住宅的保护和排灌站、农业加工厂的电气设备等固定安装的农业机械的保护。

选择依据　①按电网情况及电源条件选择。剩余电流动

作保护器的极数和额定电压应与供电系统的相数和额定电压相匹配。②考虑自然条件、气候条件及环境对选择的影响。剩余电流动作保护器应与使用环境条件相适应；对电源电压偏差较大地区的电气设备应优先选用动作功能与线路电压无关的剩余电流动作保护器；在高温或特低温环境中的电气设备应选用非电子型剩余电流动作保护器；作为家用电器保护用的剩余电流动作保护器，必要时可选用具有过电压保护的剩余电流动作保护器；安装在易燃、易爆、潮湿或有腐蚀性气体等恶劣环境中时，应根据有关标准选用特殊防护条件的剩余电流动作保护器，或采取相应的防护措施。如潮湿场所适宜安装额定剩余动作电流为 0.03A 及以下一般型的剩余电流动作保护器。③按被保护负荷的性质选择。对应用电子元器件较多的电气设备，电源装置故障含有脉动直流分量时，应选用 A 型剩余电流动作保护器。对负荷带有变频器、三相交流整流器、逆变器、UPS 装置及特殊医疗设备（例如 X 射线设备、CT）等产生平滑直流剩余电流的电气设备，应选用 B 型剩余电流保护电器。

安装注意事项　①符合安装运行规程的要求。②在不同的系统接地形式中应正确接线，安装剩余电流动作保护器后，不能撤掉低压供电线路和电气设备的保护接地措施，但应按有关规程要求进行检查和调整。③剩余电流动作保护器安装前应检查额定电压、额定电流、额定剩余动作电流及分断时间等是否与所安装的线路相匹配。④剩余电流动作保护器的接线端标有电源和负载时的接线要求时，必须按标志要求进行接线，电源侧与电源进线连接，负载侧连接用电设备，不得反接。⑤严格区分中性线和保护线，中性线应接入三极四线式或四极式剩余电流动作保护器。经过剩余电流动作保护器的中性线不得作为保护线，不得重复接地或接设备外露可导电部分。保护线不得接入剩余电流动作保护器。⑥按制造厂规定的安装位置安装。⑦剩余电流断路器的短路能力应与安装地点可能发生的短路电流匹配，必须保证在电弧喷出方向有足够的飞弧距离。安装带有短路保护的剩余电流动作保护器外部连接的控制回路，应使用铜导线，其截面积不小于 1.5mm^2。

运行维护　剩余电流动作保护器安装好以后，应按有关电气设备安装规程的要求，检查绝缘电阻。电子式剩余电流动作保护器的电子线路会使电源线之间的绝缘电阻降低，但也不应小于几十千欧至几百千欧。在安装以后及投入使用以前至少应操作试验按钮试验 3 次，检查剩余电流动作保护器的动作功能。在以后的使用过程中，也要定期操作试验按钮，例如每月操作一次，并且要定期检查断路器的动作功能，保证正常运行。雷雨季节应增加试验次数，雷击或其他不明原因使剩余电流动作保护器动作后，应做检查。剩余电流动作保护器动作后，应查明事故原因，除经检查确属其本身发生故障外，严禁私自撤除剩余电流动作保护器强行送电。维修应由专业人员进行。

沿革　安全用电是衡量一个国家用电水平的重要标志之一。一些技术先进的国家对安全用电的基本理论和触电保护装置的生产和应用十分重视。1912 年，德国研制出电压型保护器，用于保护电机外壳漏电；1940 年，法国发明了电流型保护器；1962 年，美国研制成功动作电流为 5mA 的电流型保护器；其后，德国、日本、法国等国家相继研制成功动作电流为 30mA 的电流型保护器。20 世纪 70 年代，各国开始制定规程，强制在一些场所安装剩余电流动作保护器。

中国于 20 世纪 70 年代开始研制剩余电流动作保护器。1986 年 9 月 3 日国家标准局颁发了 GB 6829—1986《漏电电流动作保护器（剩余电流动作保护器）》，1992 年 12 月 19 日国家技术监督局批准了 GB 13955—1992《漏电保护器安装运行》，此后历经数次修订。规定了剩余电流动作保护器的性能要求、工作条件和试验方法。中国的低压电网基本上普及了剩余电流动作保护器。

随着电子技术、微电子技术、直流电流检测、信号处理等新技术的发展，剩余电流动作保护器具备的保护功能不断提高，出现以下新的保护特征。

（1）B 型剩余电流动作保护。在对正弦交流和脉动直流剩余电流保护的基础上，可以对平滑直流剩余电流、频率至 1000Hz 的交流剩余电流进行保护。

（2）电弧故障保护。通过故障电弧的特征与正常工作电弧（如电焊）的信号和其他类似信号进行区别，实现电弧故障引起的火灾的保护，在清除故障电弧时不影响正常线路的工作。

（3）剩余电流保护无死区。通过建立故障漏电动作与已存在的剩余电流无关的漏电保护模型，采用剩余电流变化量法对故障漏电的准确识别，消除了漏电保护死区，从根本上提高了漏电保护的可靠性。

（4）剩余电流相量显示。采用信号处理技术，由三个分量表示剩余电流，为用户准确掌握实际剩余电流状态提供了有效方法，提高了查找漏电故障的准确性和采取预防措施的有效性。

（5）剩余电流保护自动跟踪。根据漏电电流的变化快慢实现故障漏电与正常漏电的区分，在正常漏电电流变化时，自动改变漏电动作阈值，实现自适应漏电保护，提高漏电保护的有效性。

shipin jiagongji

食品加工机　(food processing machine)　以电动机为动力，对食品或其他与餐饮有关的食物进行加工处理的家用电器。按照功能不同，分多功能食品加工机和单一功能食品加工机；按照加工处理食物的不同，可分为榨汁机（见图）、搅拌器、绞肉机、面条机、切片机、研磨器、搅碎机、和面机等。


榨汁机

食品加工机由电动机、壳体、电控电路、工作头等组成。由电动机提供驱动力，驱动工作头工作。根据功能的需要，工作头的工作状态可以是高速旋转的（如对硬质食物粉碎搅碎机），可以是低速旋转的（如对奶油搅拌的搅拌机）；可以是旋转运动的，也可以是往复运动的（如羊肉切片机）。

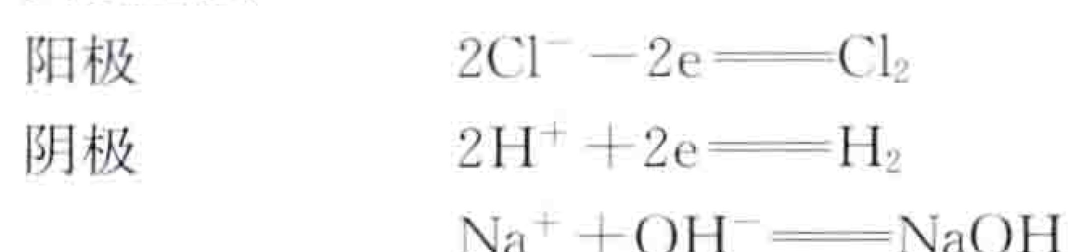
不同于其他家用电器，厨房器具的工作头在工作时多呈运动状态，容易发生人身伤害事故。因此，除了产品本身的安全结构的保障和安全防护措施的设置外，使用者也需要具备一定的产品知识和正确使用产品的基本常识。

shiyan dianjie

食盐电解 (salting liquor electrolysis) 电解饱和食盐水溶液制取烧碱（氢氧化钠）和氯气并副产氢气的过程。氯气和烧碱是化学工业的基础产品之一，应用十分广泛。1890 年，隔膜电解法电解食盐水溶液实现了工业化生产，1892 年，水银电解槽取得专利，形成水银电解法。1966 年，美国杜邦（Du Pont）公司开发出化学稳定性较好，用于宇宙燃料电池的全氯磺酸阳离子交换膜（Nafion），使离子交换膜电解法（又称离子膜电解法）电解食盐水溶液制碱得以成功，并获得较大发展。此法克服了隔膜电解法所产烧碱浓度低、氯化钠含量高、有石棉污染和水银电解法耗电多且有汞污染等缺点。1975 年，日本旭化成工业公司制成全氟羧酸型离子交换膜，首先实现离子膜电解法制烧碱，同年日本实现工业化生产。

食盐电解主要有隔膜电解、水银电解和离子膜电解等 3 种电解法。其中离子膜电解法应用最为广泛。

隔膜电解法 用多孔渗透性材料作隔层，将电解槽内的阴、阳极隔开，以分隔阴极产物和阳极产物，防止发生不良反应的电解方法。在氯碱工业中，以金属钛板为阳极，钢板为阴极，以精制饱和食盐水溶液为电解液进行电解。阳极析出氯气，阴极析出氢气，阴极附近产出氢氧化钠，其反应为



阳极 $2Cl^- - 2e = Cl_2$

阴极 $2H^+ + 2e = H_2$

$Na^+ + OH^- = NaOH$

电解产出的氯气和氢气分别用导管导出，经冷却、干燥、压缩作为成品。电解槽排出的碱液含 NaOH 10%～12%，食盐含量高，碱液浓度低，需经浓缩、回收盐后氢氧化钠方能作为成品。

电解时，将精制饱和食盐水溶液输入阳极室，利用阳极室、阴极室间液位差使溶液透过隔膜进入阴极室。所用多孔渗透性隔膜能使电解液透过，并以一定速度流向阴极，以阻止 OH^- 向阳极室扩散。这种隔膜不妨碍离子运动构成电流通路，但能防止阴极产物 H_2 与阳极产物 Cl_2 的机械混合，一般称为渗透式隔膜，通常用石棉布或石棉纸制作。新式隔膜则直接将石棉纤维吸附在阴极上构成。氯碱工业中的隔膜电解槽有多种，图 1 所示为虎克-4 型电解槽。

隔膜电解食盐水溶液技术条件与指标：进槽盐水浓度 NaCl 为 320～326g/L，槽温 95～99℃，槽电流 6～150kA，阳极电流密度 1500～2500A/m² （金属阳极），槽电压 3.4V 左右，电流效率约 95%，烧碱直流单耗约 2530kW·h/t。

水银电解法 以流动的水银层为阴极，石墨或金属为阳极，电解饱和食盐水溶液的制碱方法。阳极析出氯气，其反应与隔膜法相同。由于氢在水银阴极上的过电位比钠的过电位高，所以电解时汞阴极上不析出氢而析出钠。析出的钠与汞生成钠汞齐溶于水银中，其反应如下

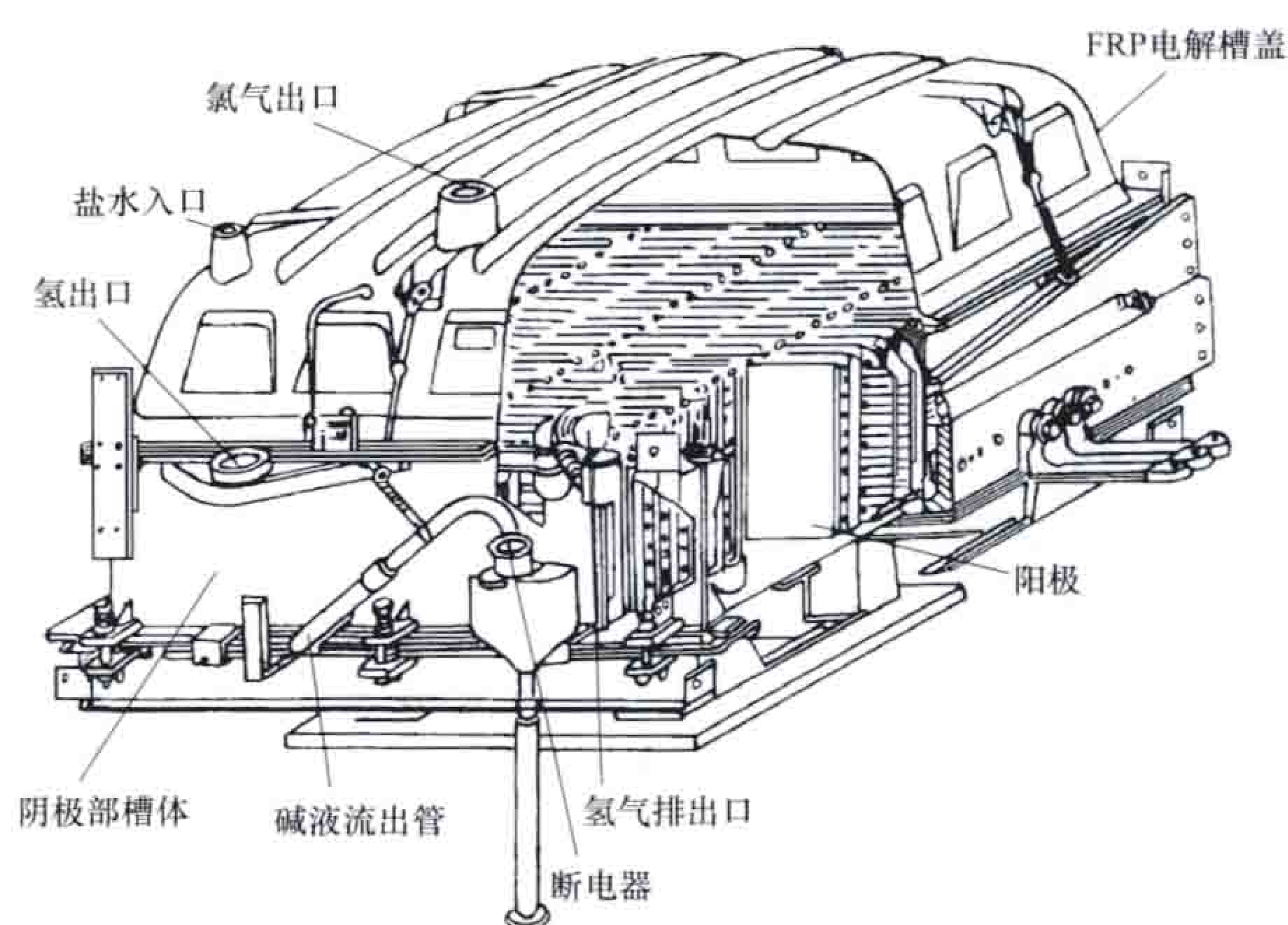


图 1 虎克-4 型电解槽

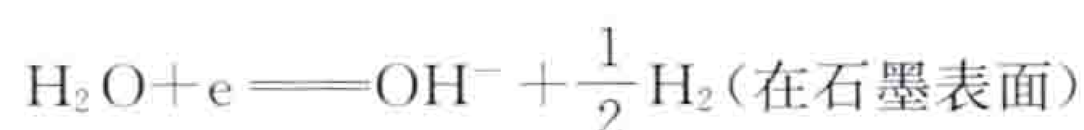


$Na^+ + e + x(Hg) = Na(Hg)_x$

钠汞齐遇水反应生成碱液、Hg 和氢气，称为解汞反应。此反应在解汞室（或解汞器）内进行。所以，水银法电解槽由相连的电解室和解汞室组合而成。现代水银电解法的解汞室多为立式塔形结构，内设石墨颗粒床。由电解室出来的钠汞齐从塔的顶部分配盘均匀流下，经石墨颗粒床与塔底流入的纯水逆流接触，组成以钠汞齐为阳极、石墨粒为阴极的原电池反应，短路放电，加速解汞反应



$Na(Hg)_x | NaOH_{水溶液}, H_2O | H_{2石墨粒}$



$H_2O + e = OH^- + \frac{1}{2}H_2$（在石墨表面）



$Na(Hg)_x = Na^+ + (Hg)_x + e$（在钠汞齐表面）

总反应为



$Na(Hg)_x + H_2O = NaOH + \frac{1}{2}H_2 + (Hg)_x$

解汞是放热反应，可使塔内温度保持在 100℃左右而无外加热。反应生成的氢气经塔顶冷却器冷却后导出。碱液从塔上部导出，汞则用水银泵返回使用。图 2 所示为水银电解法流程图。

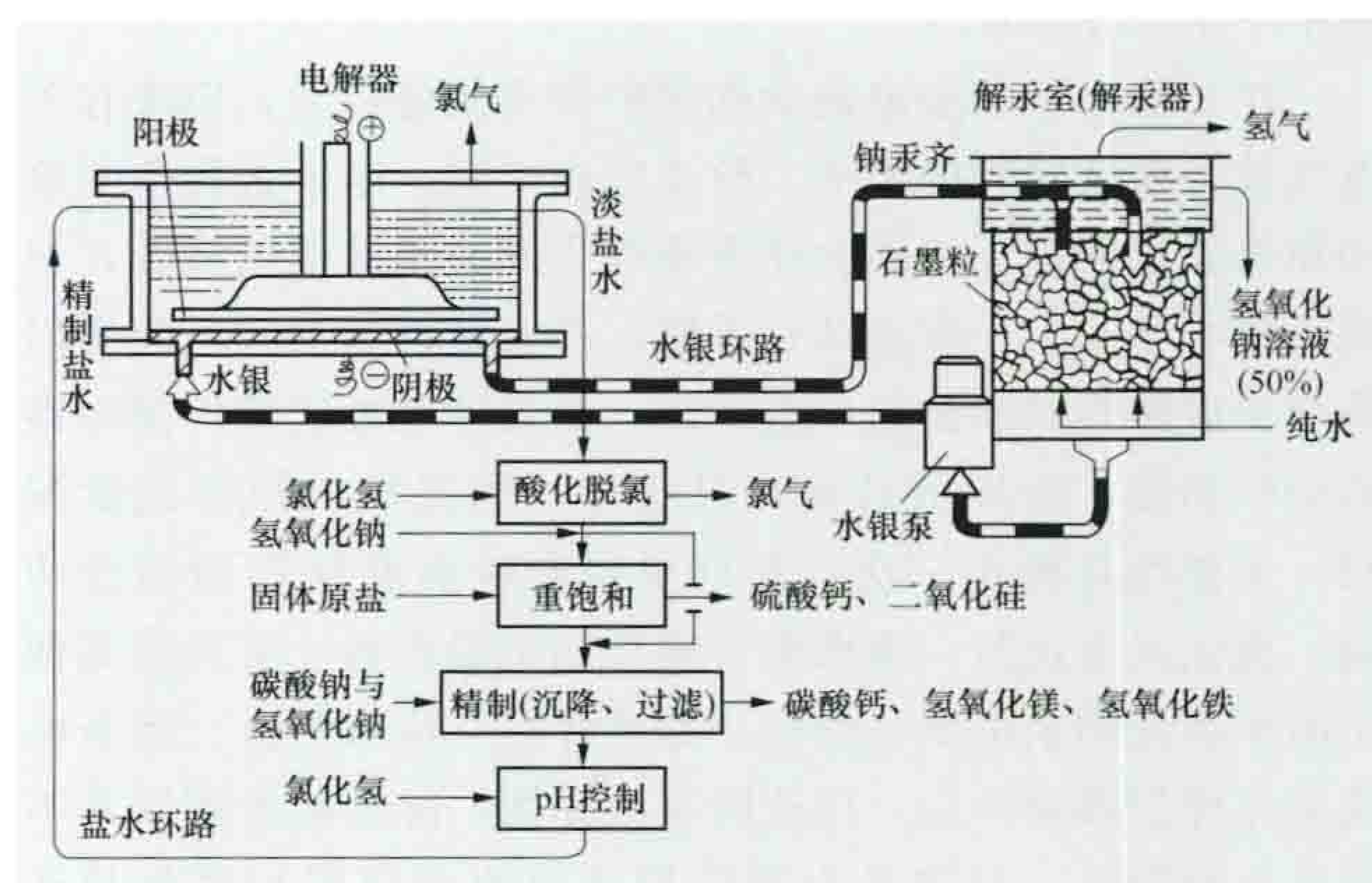


图 2 水银电解法流程图

水银电解法电解槽的种类很多，图 3 所示为伍德型电解槽。现代水银法电解槽的阴、阳极间距多用电子计算机控制。

水银电解法技术条件与指标：入槽盐水浓度为 310～

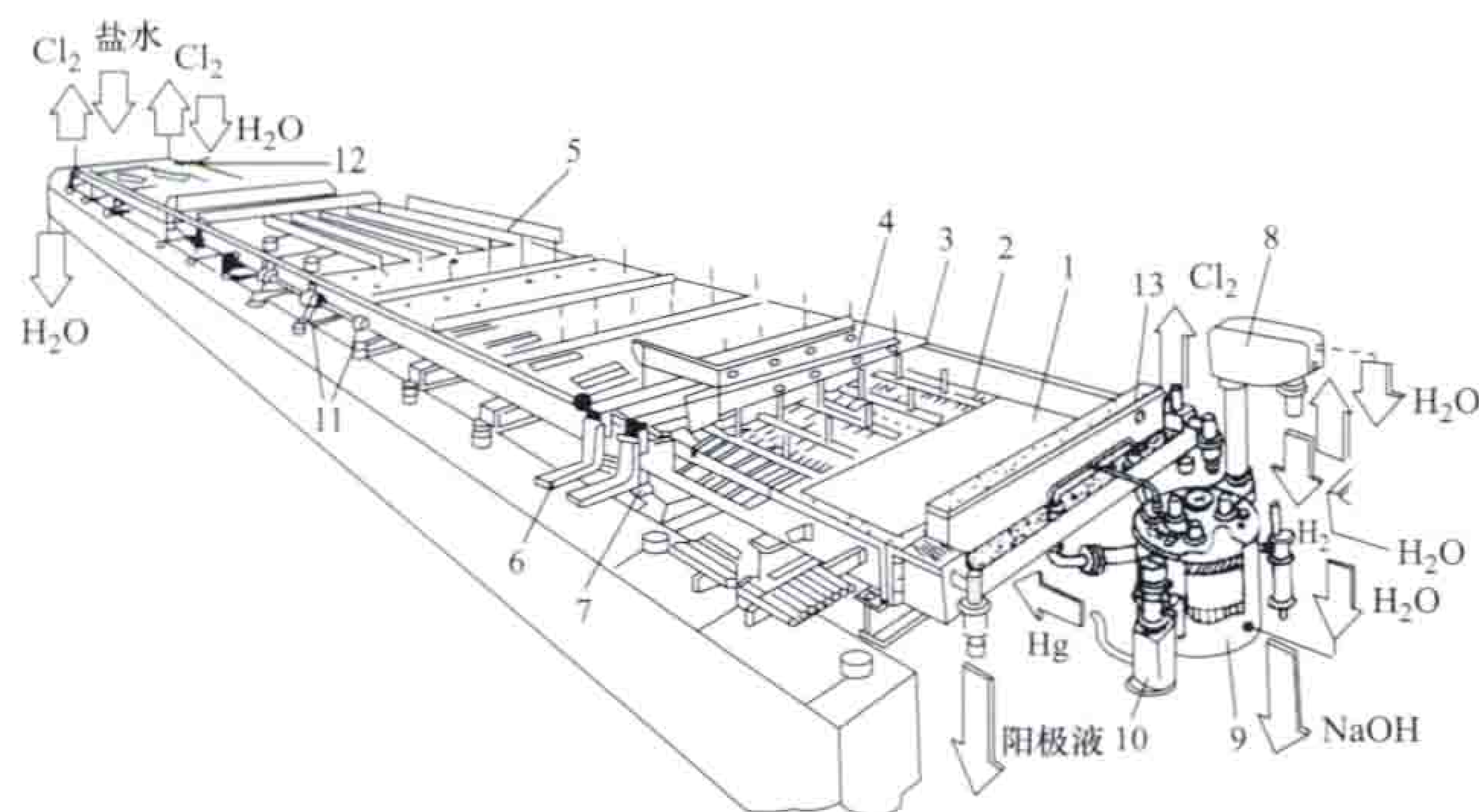


图 3 伍德型电解槽

1—槽底；2—阴极；3—盖封；4—槽盖；5—阳极组调节器；6—槽间铜板；7—除槽开关；8—氢冷却器；9—解汞塔；10—水银泵；11—阳极调节器；12—加料箱；13—槽尾箱

315g/L，电解槽温度为75℃，出槽淡盐水浓度为270g/L左右，钠汞齐含钠0.2%左右，电流强度为15～500kA，石墨阳极电流密度为$2kA/m^2$，金属阳极电流密度为$15kA/m^2$，石墨阳极槽电压为5V以上，金属阳极槽电压为4.5V左右，电流效率为97%左右，碱液含碱50%，每吨烧碱直流电耗约为3200kW·h。

离子膜电解法　利用阳离子交换膜将阴、阳极隔开进行食盐水溶液电解的方法。具有固定离子和对离子（或称解离离子、相反离子）的膜有容许带一种电荷的离子通过而限制相反离子通过的能力。电解食盐水溶液使用磺酸型阳离子交换膜，其活性基团中的对离子Na^+可与水溶液中的Na^+进行交换，从而使其通过，而活性基团中的固定离子却限制溶液中Cl^-和OH^-通过，从而获得高纯度氢氧化钠溶液。生产中将精制饱和食盐水溶液加到阳极室，将纯水和稀氢氧化钠液加到阴极室，通电后，其离子按图4所示方向移动，在阳极析出氯气，在阴极析出氢气，在阴极附近生成氢氧化钠，其反应和隔膜电解法的相同。

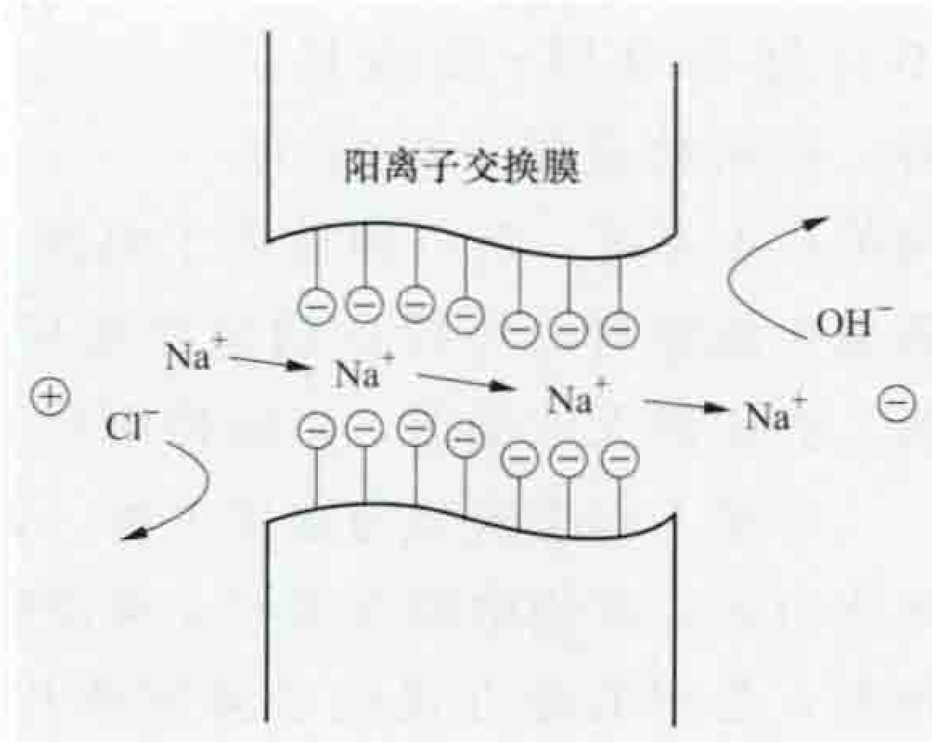


图 4 离子交换膜示意图

离子膜电解法制碱对盐水质量的要求远远高于隔膜电解法和水银电解法，因此需增加盐水二次精制工序。离子膜电解槽按供电方式可分为单极式和复极式电解槽。单极式电解槽一般适用于小规模生产，单台生产能力小；复极式电解槽一般适用于大规模生产，单台生产能力大。

离子交换膜电解槽主要由槽体、阳极、阴极、离子膜和直流电源组成。每台电解槽由若干个单元槽串联或并联组成。阳极用金属钛网制成，为了延长电极使用寿命，提高电流效率，阳极网上涂有钛、钌等氧化物涂层；阴极由碳钢网制成，上面涂有镍涂层；电极均为网状，可增大反应接触面积。离子膜是离子膜电解法的主要部件，具有以下特征：①阳离子选择透过性好；②电解质扩散率低；③较高的化学稳定性和热稳定性；④机械强度高，不易变形；⑤电阻小。

图5所示为旭化成标准型复极槽的单元槽结构。

离子膜电解法可制得含氯化钠极低而含氢氧化钠高达35%的浓碱，电解温度为80～90℃，槽电流为50～200kA，电流密度为3～$6kA/m^2$，槽电压为2.9～3.3V，电流效率约95%，制备每吨烧碱直流电单耗2250～2350kW·h。

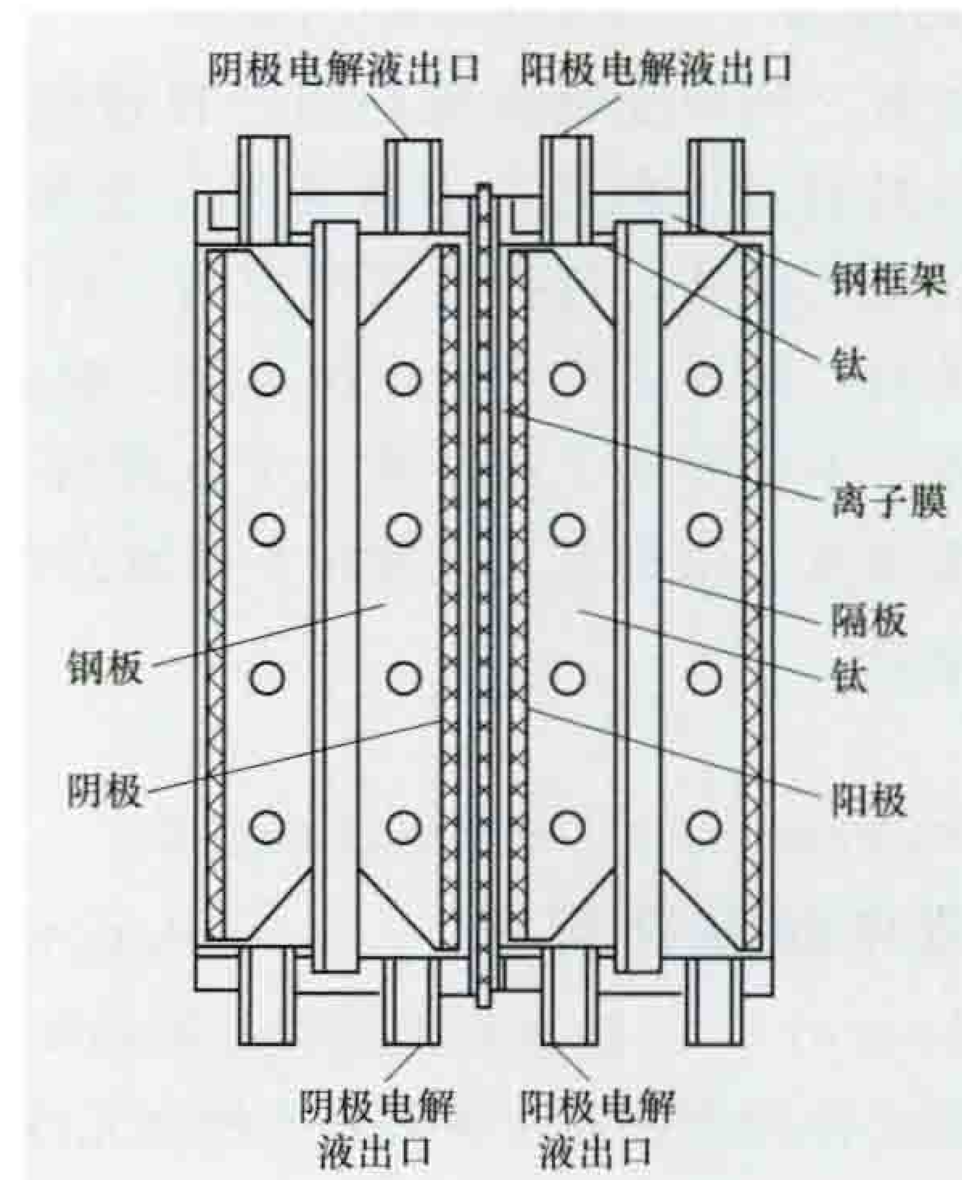


图 5 旭化成标准型复极槽的单元槽结构

参考书目

李相彪．氯碱生产技术．北京：化学工业出版社，2010.

shoucheshi kaiguangui

手车式开关柜　（switchgear panels with switching devices on truck）　由固定的柜体和可移开的手车组成的开关柜，是移开式开关柜的一种。分为落地式手车和中置式手车，前者手车上根据不同间隔的需要分别装有断路器、互感器、站用变压器、避雷器等元件，手车轨道在地面上，离隔离插头静触头较远。后者手车上仅安装断路器，手车轨道位于开关柜中部（又称中置式开关柜），离隔离插头静触头较近，手车部分互换性好，检修或维护时只需更换手车，可缩短检修停电时间，适用于负荷较重要或建筑面积较小的场所。按柜内结构不同，又可分为间隔式和金属铠装式两种。柜内根据检修、绝缘等要求分成小室，减少相互影响。小室分为手车室、主母线室、互感器室、继电保护和仪表室等。柜体正面有门，所有仪表都装在门的内侧或仪表室内。检修时打开门，仪表即可外露。柜内设有照明，通过门上的观察窗可观察少油断路器的油位或真空断路器的灭弧室。手车具有三个固定的操作位置：运行位置、检修位置和试验条件下能操作的位置。手车式开关柜还有防止误操作功能，当电气回路有误操作时，断路器能自动分闸且断路器在合闸位置时接地开关不能合闸等。为使手车式开关柜便于操作，手车上设有手摇机构，可手动操作手车灵活进出开关柜。



手车式开关柜

手车式开关柜已广泛应用于3～35kV变电站，将逐步取代固定式开关柜，见图。

shoudiandian

受电点 (connection point) 用户受电装置所处的位置。用户受电装置是用户自建的能直接从供电网受电，且具有对电能进行有效控制、交换（转换）、分配等功能的电气设施，包括高压用户的一次变电站或变压器台、开关站，低压用户的低压配电室、配电屏等。对同一受电装置，不论有几个回路或几个电源对其供电，都视为是一个受电点。用户有几个设在不同地点的受电装置就有几个受电点。

shuangdianyuan liansuo zhuangzhi

双电源联锁装置 (double power source interlocking device) 防止双电源误并列和反送电，在相互连接的电器元件间设置的一种可靠的控制元件和设备。双路电源能否并列运行，取决于它们的电压、频率和相位是否相同。禁止并列运行的两个电源，若并列运行，轻者（环流较小）造成局部负荷用电的中断，重者（环流较大）造成大面积停电事故。当两个电源的相位不对应进行误并列时，会产生相间短路，除造成大面积停电外，还会烧坏并列点的设备和危及人身安全。双电源联锁装置根据动作原理分为机械式和电气式两大类。智能数码双电源切换装置具有机械和电气双重联锁。

机械联锁装置 钥匙盒、刀型转换开关和连杆式传动装置属机械联锁装置。

甲、乙两个电源各有一个钥匙盒。操作乙电源的钥匙放入安装在甲电源的开关传动轴上的钥匙盒内，操作甲电源的钥匙放入安装在乙电源的开关传动轴上的钥匙盒内。当甲电源开关处于分闸位置时，钥匙盒盖开启，取得钥匙打开乙电源锁，合上乙电源。当甲电源处于合闸位置时，钥匙盒关闭，无法取出钥匙，不能打开乙电源的锁，乙电源处于分闸位置。依据两个电源开关分、合位置来相应控制钥匙盒的开与闭，达到联锁的目的。

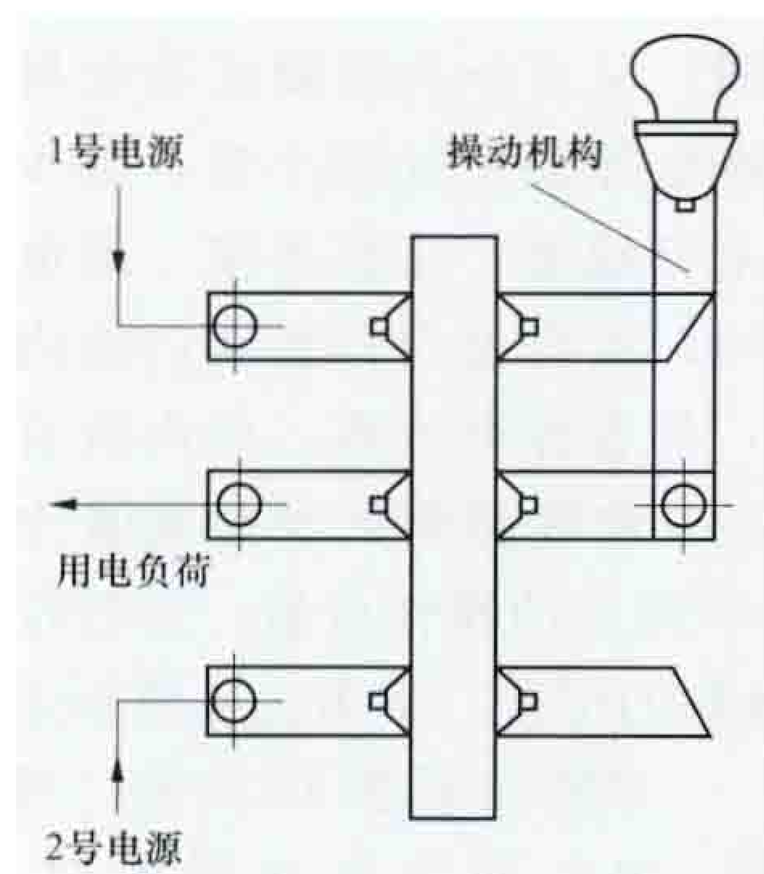


图 1 刀型转换开关

刀型转换开关用于交流电压380V，直流电压400V，额定电流1500A及以下的低压配电装置中，实现双电源联锁的工作原理见图1。两电源分别接于刀型转换开关两侧，用电负荷接于刀型转换开关中间处，通过操动机构或手柄将动触头向刀型转换开关两侧倒换，完成两电源联锁。刀型转换开关按极数分为单极、双极、三极；按操动方式分为中央手柄式、中央正面杠杆操动机构式、侧方正面杠杆操动机构式；按灭弧性能分装有灭弧室和不装灭弧室。

连杆式传动装置（见图2）。用于装设在墙上的两个电源开关间，使两个开关只能有一个合闸或两个全部分闸。当操动机构1手柄拉起时，联锁轴上的滑杆一端即从圆盘滑槽内滑出，由于斜面推力使滑杆的另一端推入操动机构2的圆盘小孔，保证操动机构2不能动作。

电气联锁装置 通过低压断路器或交流接触器的辅助触点，控制开关的操作电源，达到两个电源间联锁（见图3）。

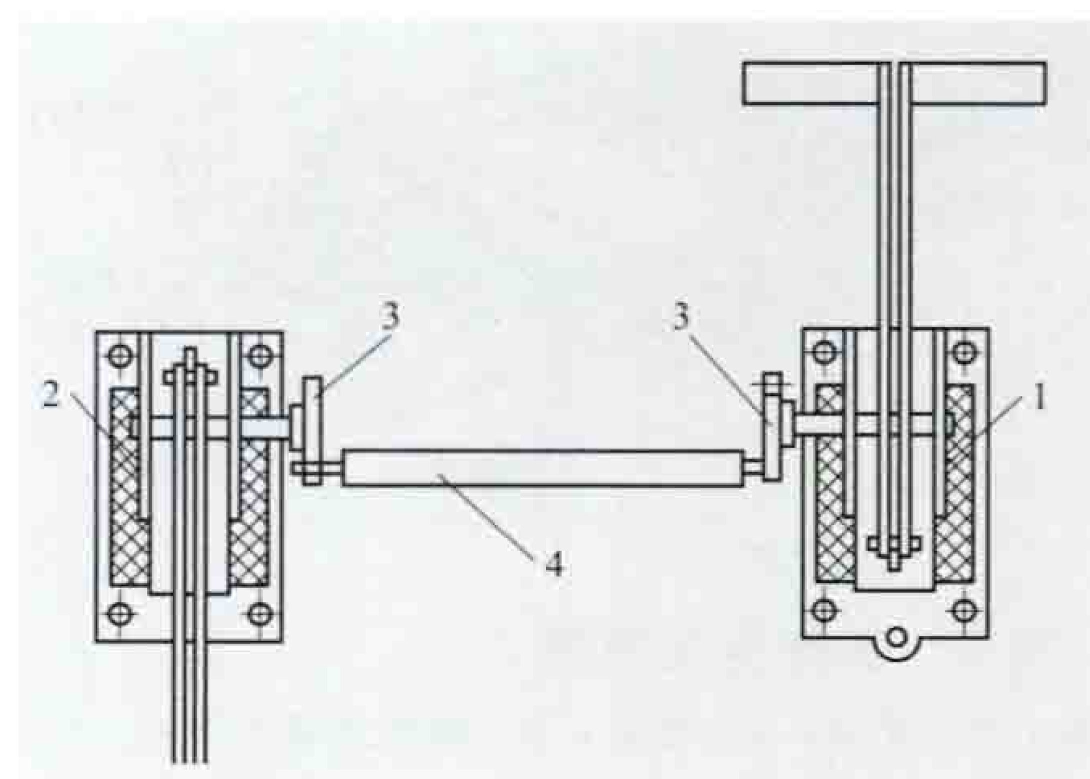


图 2 连杆式传动装置

1、2—操动机构；3—圆盘；4—联锁轴

使用该联锁装置可实现当常用电源停电后，备用电源自动投入运行；在备用电源自动投入的情况下，当常用电源恢复供电后，将备用电源断开，即自动恢复最初的运行方式；当常用电源因负荷侧故障掉闸时，备用电源拒绝投入，直至事故处理后，用手动恢复供电。按投入方式该装置可分为自投、自投自复、互投、互投自复电气联锁装置。

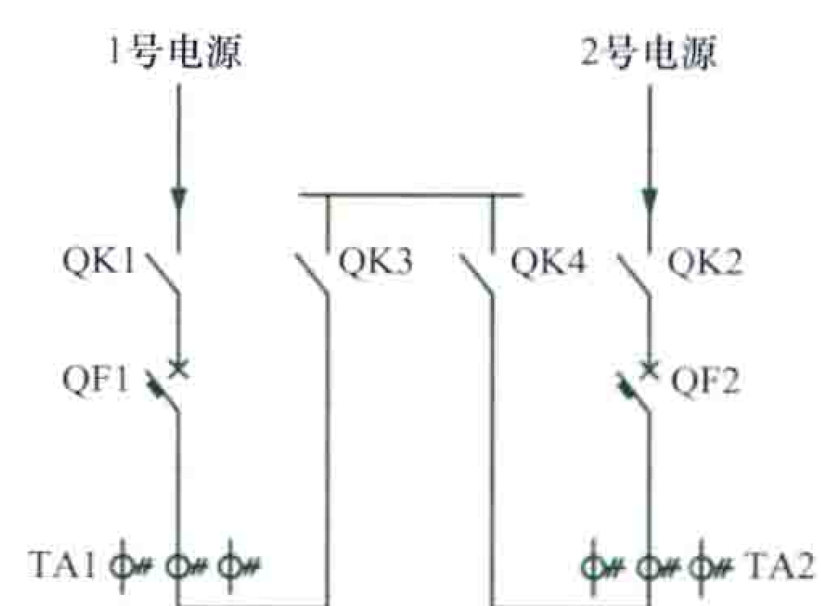


图 3 电气联锁装置

QK1～QK4—刀开关；
QF1、QF2—低压断路器；
TA1、TA2—电流互感器

智能数码双电源切换装置 有自动和手动两种工作模式，具有机械联锁和电气联锁双重保护功能，以防止两路电源的断路器同时合闸。

自动工作模式按控制功能分为自投自复、自投不自复和电网-发电机3种。前两种适用于电网-电网的供电系统，后一种适用于电网-发电机系统。当一路电源发生故障时，可以自动完成常用电源与备用电源间的切换，而无需人工操作，以保护用户供电的可靠性。

手动工作模式分为常用电源、备用电源和断电再扣3种工作方式。常用电源方式用于强制断开备用电源，接通常用电源；备用电源方式用于强制断开常用电源，接通备用电源；断电再扣方式既可将两路电源全部断开，也可使因故障脱扣的断路器再合闸。手动工作模式下系统将无自动切换功能。

shuidianjie

水电解 (water electrolysis) 用电解方法分解水制取氢气的过程。该方法能够制取纯度高达99.8%的氢气，同时副产氧气，其纯度达99.5%。氢气主要用于合成氨、硬化油脂、合成盐酸等，氧气主要用于氢氧吹管、氧炔吹管、炼钢等。同时，利用氢气和氧气可以降低水电解的生产成本。早在1800年英国物理学家W.尼科尔森（W. Nicholson，1753—1815）已从电解水制得氧气和氢气，但直到1913年才实现了工业化。

电解原理 水电解以碱性水溶液为电解液，通直流电后，在阴极析出氢气，在阳极析出氧气。由隔膜隔开的氢和氧分别用导管导出。电解时的电极反应如下


阴极　　$4H_2O+4e=2H_2+4OH^-$


阳极　　$4OH^-=O_2+2H_2O+4e$

纯水的电导率很低，不适于电解。加酸或碱可以大大提高水的电导率。酸对电解槽会产生腐蚀作用，实际生产中都以25%～30%的氢氧化钠或氢氧化钾作为电解液，操作温度约85℃，电流密度1500～3000A/m²，槽电压1.8～2.5V，电流效率在99.5%以上。在标准状况下，每生产1m³的氢和0.5m³的氧消耗电能4.5～6kW·h。

电解槽　水电解的单个电解槽由槽体、阳极、阴极、隔膜组成。槽体材料多用钢材，阳极为镀镍钢板，阴极曾采用碳钢板，为降低析氢过电位，已广泛采用多种高比表面的镍合金镀层和雷尼镍。隔膜材料有聚丙烯、多孔镍板、钛酸钾纤维等。水电解槽按照电极的性质可分为单极性电解槽和双极性电解槽两大类，此外，还有固体聚合物电解质电解槽。

单极性电解槽　多为箱式结构。箱内装有相当数量的阴极和阳极，分别与电源负极、正极并联，其总电压等于一对电极间的电压，总电流为成对电极的电流总和。槽内的隔膜一般用石棉布做成口袋形状，套在阴极或阳极上，如图1所示。这种电解槽设备体积大、效率低、导线接点多，故电能损失也大，已很少使用。

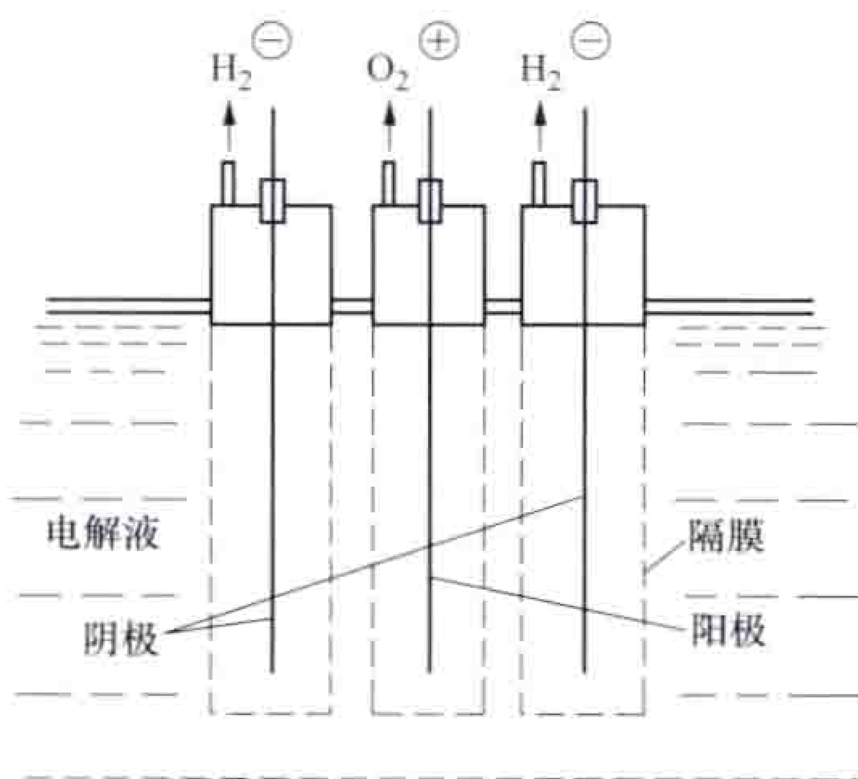


图1　箱式水电解槽

双极性电解槽　多为压滤式结构，以其形似过滤用的压滤机而得名，由一个阳极、一个阴极、中间若干复极和石棉隔膜交替串联而成，如图2所示。电解过程中，复极的一个侧面作为阳极产生氧，另一个侧面作为阴极产生氢，一块极板具有两种极性。石棉隔膜把相邻两个电极所产生的氢、氧气隔离开，此相邻两电极便构成电解小室。电解槽的一端接正极，另一端接负极，与电源是串联起来的。所通过的电流大小对每一个电流小室都是一样的（微量电流漏损），总电压为所有电解小室电压之和。此电解槽结构紧凑、效率高、工作可靠、调整维护方便，且电能损失小，已得到广泛使用。双极性电解槽又有常压、低压和中压之分，其中小于0.1MPa的为常压，0.1～0.5MPa的为低压，1.5～3.0MPa的为中压。压力型电解槽因为比常压型具有很多优点，故发展迅速。

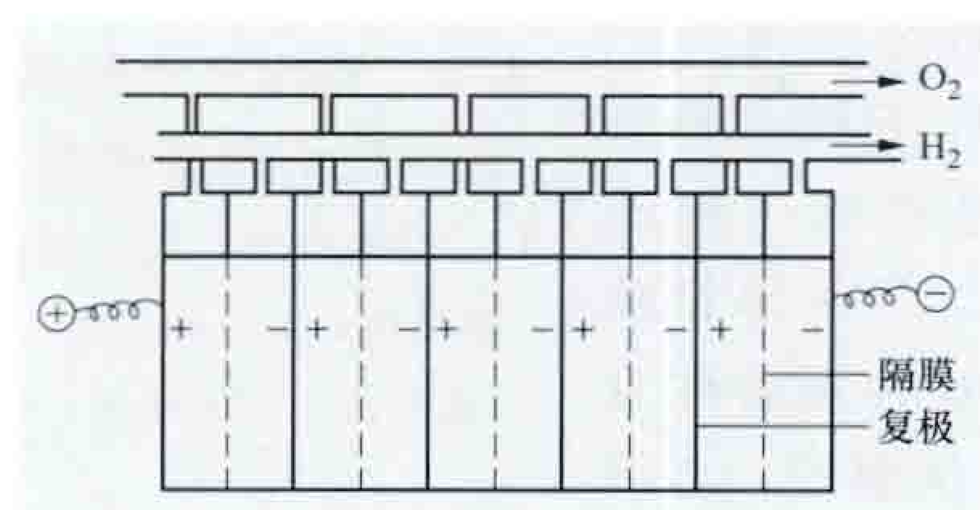


图2　压滤式水电解槽

固体聚合物电解质（SPE）电解槽　采用一层薄的全氟磺酸膜拜既作为固体聚合物电解质，也作为隔膜。膜拜的两面分别涂上多孔的电催化剂涂层作为阳极和阴极。工作时，纯水加至阳极侧，发生生成O_2和H^+的反应，H^+通过聚合物中的电解质进入阴极，通过阴极还原反应析出H_2，如图3所示。

SPE电解槽的优点是结构简单，工作可靠，可维修，膜能阻止气体混合，有利于安全及提高气体纯度。

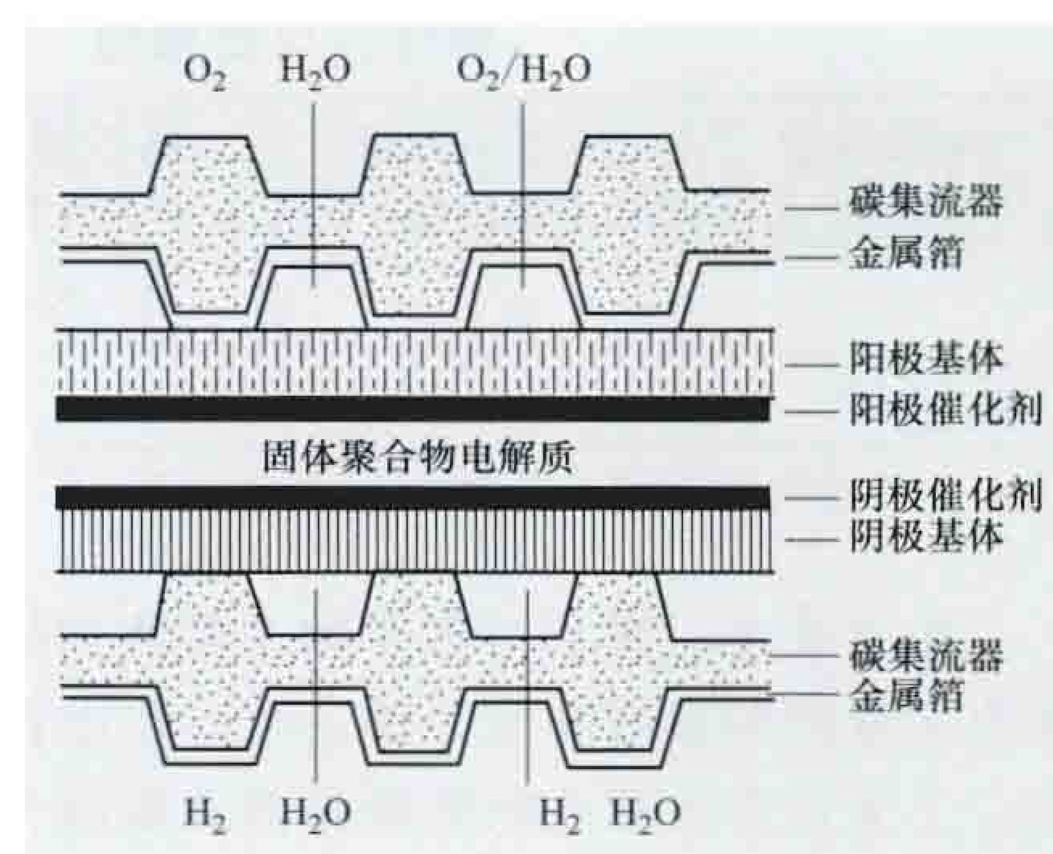


图3　SPE电解槽

shuntai guodianya

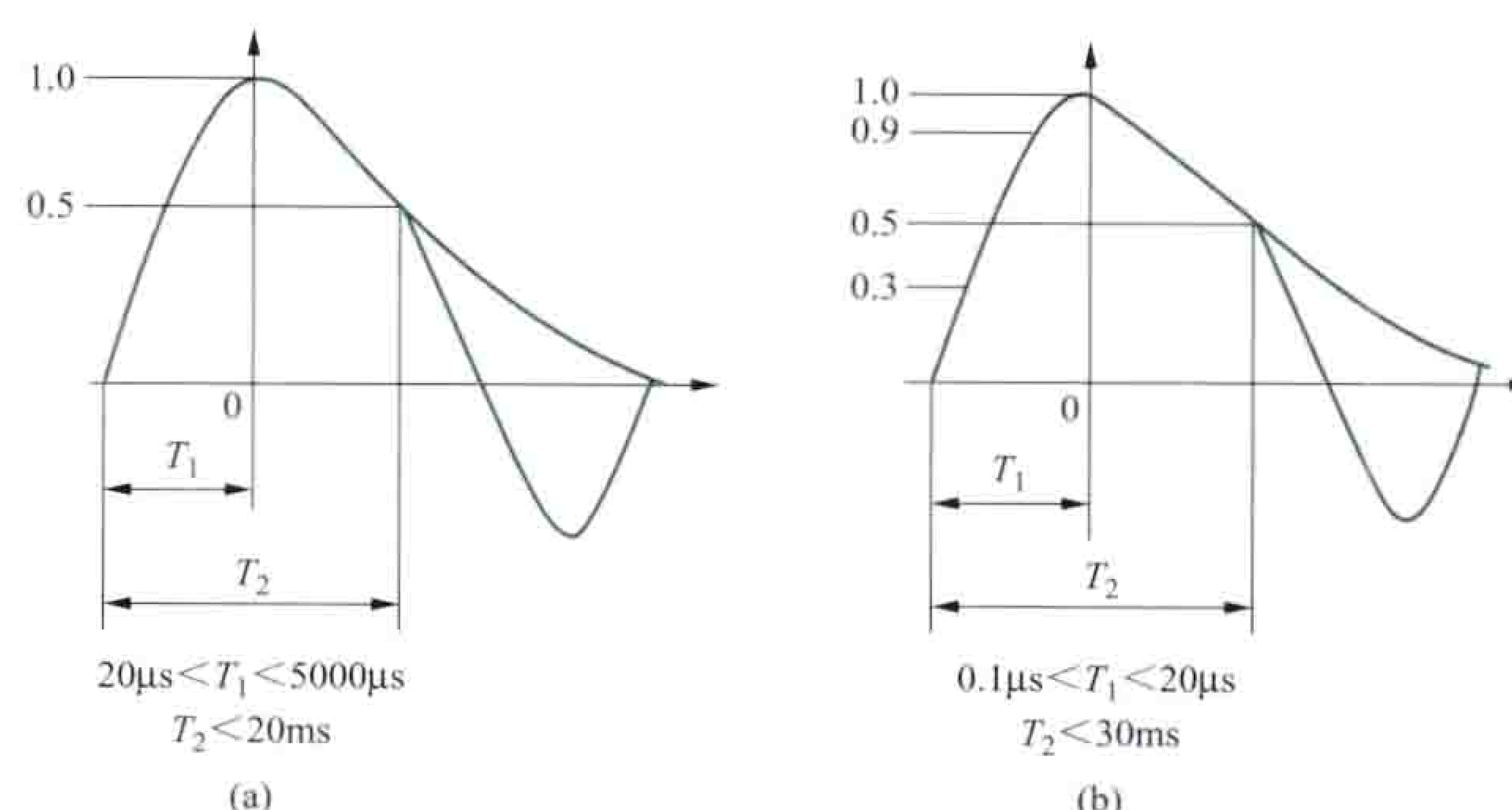
瞬态过电压

（transient overvoltage）　持续时间数毫秒或更短，通常带有强阻尼的振荡或非振荡的一种过电压。瞬态过电压可以叠加于暂时过电压上。

分类　瞬态过电压包括操作（缓波前）过电压和雷击（快波前）过电压。

操作过电压通常是单极性的且峰值时间在20～5000μs之间，半峰值时间小于20ms。操作过电压主要由线路切、合与重合，故障与切除故障，开断容性电流和开断较小或中等的感性电流，以及负荷突变所引起，还与断路器（或熔断器）性能、电力系统中性点接地方式密切相关。受诸多随机因素影响，操作过电压波形参数、幅值都是随机的变数，其典型波形见图（a）。

雷击过电压又称大气过电压。通常也是单极性的，其波前时间在0.1～20μs之间，半峰值时间小于300ms。雷击过电压因雷电放电引起，有直击雷过电压和感应雷过电压，包括雷直击于导线、雷击于塔顶或避雷线后反击导线而产生的过电压，以及雷击于线路及其附件地面（包括塔顶），因电磁场的激烈变化产生的感应过电压。其典型波形见图（b）。



瞬态过电压典型波形

（a）缓波前；（b）快波前

标准　GB/T 18481—2001《电能质量　暂时过电压和瞬态过电压》，规定了电力系统中作用于电气设备的瞬态过电压要求、电气设备的绝缘水平，以及过电压保护方法。操作过电压限值（包括空载线路合闸、单相重合闸、成功的三相重合闸、非对称故障分闸及振荡解列等操作）

见表。

操作过电压限值

电压等级（kV）	过电压限值（标幺值）	电压等级（kV）	过电压限值（标幺值）
500	2.0*	3～220	3.0
330	2.2*		

* 该过电压为相对地统计操作过电压。

防护措施　瞬态过电压的主要防护措施包括：①电力系统中的保护装置应与发、输、配、用电设备的绝缘水平相配合。②采用带并联电阻的断路器来限制合闸、重合闸过电压幅值。③切除空载变压器，可用并联避雷器加以保护。④安装避雷针（线）对高压配电装置进行直击雷保护，并采取措施防止反击；在厂、站、所内安装避雷器，防止和减少雷电侵入波过电压的危害。⑤对各电压等级线路可适当选择线路绝缘水平、采用避雷线、设置杆塔接地装置以及采用线路避雷器，以减小绝缘子雷击闪络的概率。

sifu diandongji

伺服电动机

（servomotor）　输出参数（如位置、速度、加速度或力矩等）可被控制的交流或直流电动机。它是应用于运动控制系统中的控制电机。它的输出参数，如速度、加速度或转矩是可控的。伺服电动机的基本性能是：良好的可控性、稳定的运行性能和快速的响应性能。这种电动机由于接到信号时能快速起动，失去信号时能迅速自行停转，因而有“伺服”之名。



图 1　伺服电动机

伺服电动机（见图 1）有直流和交流两类。具有能做相对直线运动部件的伺服电动机叫直线伺服电动机。

直流伺服电动机　采用直流电动机结构的伺服电动机。其工作原理与一般直流电动机相同，如图 2 所示。当励磁绕组通入电流并产生磁通，电枢绕组也通过电流时，这个电枢电流与磁通相互作用产生电磁转矩使伺服电动机投入工作。这两个绕组中的任一个断电时，电动机立即停转。直流伺服电动机的控制方式有两种：改变电枢电压的电枢控制和改变励磁电压的磁场控制。一般多采用电枢控制，机械特性和调节特性均为线性，时间响应迅速。

直流伺服电动机的结构除了有与一般直流电动机相同的之外，还有无槽电枢直流伺服电动机、无铁芯直流伺服电动机和无刷直流伺服电动机（即方波的永磁同步电动机）。无槽电枢直流伺服电动机的电枢绕组安放在无槽转子铁芯表面上。无铁芯直流伺服电动机的电枢部分没有铁磁物质，电枢绕组由导线排列成空心杯型的称为杯型电枢直流伺服电动机；电枢绕组由导线排列成盘状的称为线绕盘式直流伺服电动机；印制绕组直流伺服电动机是由两层或两层以上导电金属箔（铜或铝等）组成的平面绕组构成无铁芯盘式电枢的直流伺服电动机，其平面绕组用印制电路制作方法或其他方法制成。无刷直流伺服电动机是没有电刷、换向器，采用电子换向的直流伺服电动机。

直流伺服电动机在一些小功率精密设备中还有应用，但逐渐被交流伺服电动机取代。

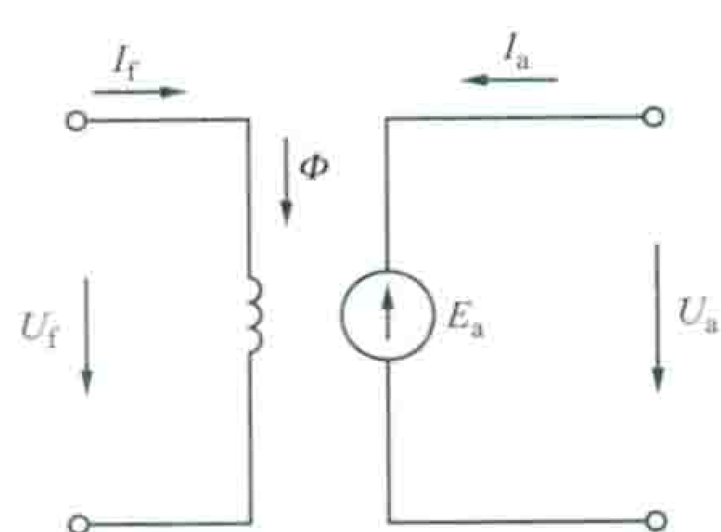


图 2　直流伺服电动机工作原理图

U_a、I_a、E_a—电枢电压、电枢电流、电枢反电动势；U_f、I_f—励磁电压、励磁电流；Φ—每极磁通

交流伺服电动机　采用交流电动机结构的伺服电动机。有两相交流伺服电动机和永磁交流伺服电动机。

两相交流伺服电动机采用感应电动机结构，定子铁芯由冲有齿和槽的硅钢片叠压而成，定子上有两个空间相差 90°电角度的励磁绕组 Lf 和控制绕组 Lk。常用的转子结构有笼型和非磁性杯型。笼型转子与一般笼型感应电动机的转子结构相似，但细而长，其励磁电流较小，体积较小，机械强度较高，应用广泛。具有非磁性杯型转子的称为杯型转子两相交流伺服电动机。非磁性杯型转子用非磁性金属铝、紫铜等制成，可以在内、外定子间的气隙中自由旋转。这种转子惯量小、运行平滑、灵敏度高，主要用于要求低速、平滑运行的系统中。

两相交流伺服电动机的工作原理与感应电动机相同，如图 3 所示。励磁绕组接单相交流电压 $\underline{U}_f$，控制绕组接控制信号电压 $\underline{U}_k$。控制电压为零时，气隙内为脉振磁场，电动机无起动转矩，转子不转。若加上控制电压，且控制绕组内的电流与励磁绕组内的电流相位不同，则在气隙内建立旋转磁场，有了起动转矩，转子旋转。如果交流伺服电动机的参数选择得与一般单相感应电动机相似，它就会和单相感应电动机一样，电动机一经转动，即使除去控制电压，只有单相励磁时，还会继续转动，这种现象称为自转。自转现象破坏了伺服性，必须避免自转的产生。增大转子电阻可以克服自转现象，因此，设计时转子电阻的选择应以满足单相供电不自转的要求为前提。

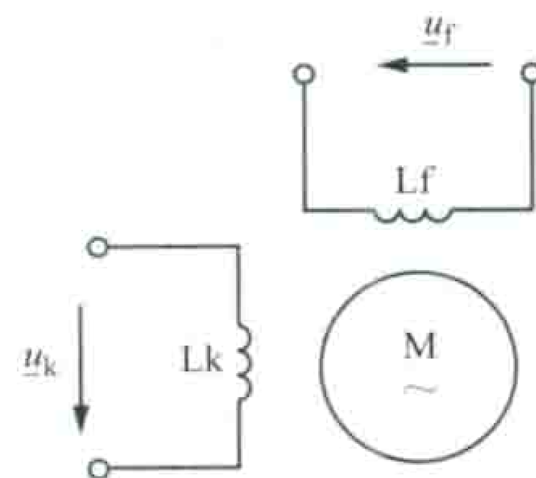


图 3　两相交流伺服电动机工作原理图

Lf—励磁绕组；Lk—控制绕组；$\underline{u}_f$、$\underline{u}_k$—励磁电压、控制电压

两相交流伺服电动机的两相绕组由频率相同的互相独立的交流电压控制，以这两个电压的幅值或相位差的改变来控制电动机的输出转矩、转速和转向。两相交流伺服电动机的控制方式有幅值控制、相位控制、幅值-相位控制 3 种。①幅值控制。由改变控制绕组上信号电压的幅值大小来控制。②相位控制。由改变控制绕组上信号电压的相位来控制。③幅值-相位控制。由改变控制绕组上信号电压的幅值大小和相位来控制。由于幅值-相位控制的线路简单，输出功率较大，故较多采用。

永磁交流伺服电动机采用永磁同步电动机结构，在控制系统控制下，综合输入指令和转子位置检测信号，由输入绕组电流的幅值和相位的变化来控制电动机输出转矩、转速和转向。永磁交流伺服电动机在高性能伺服中占据着垄断地位，应用最广泛。

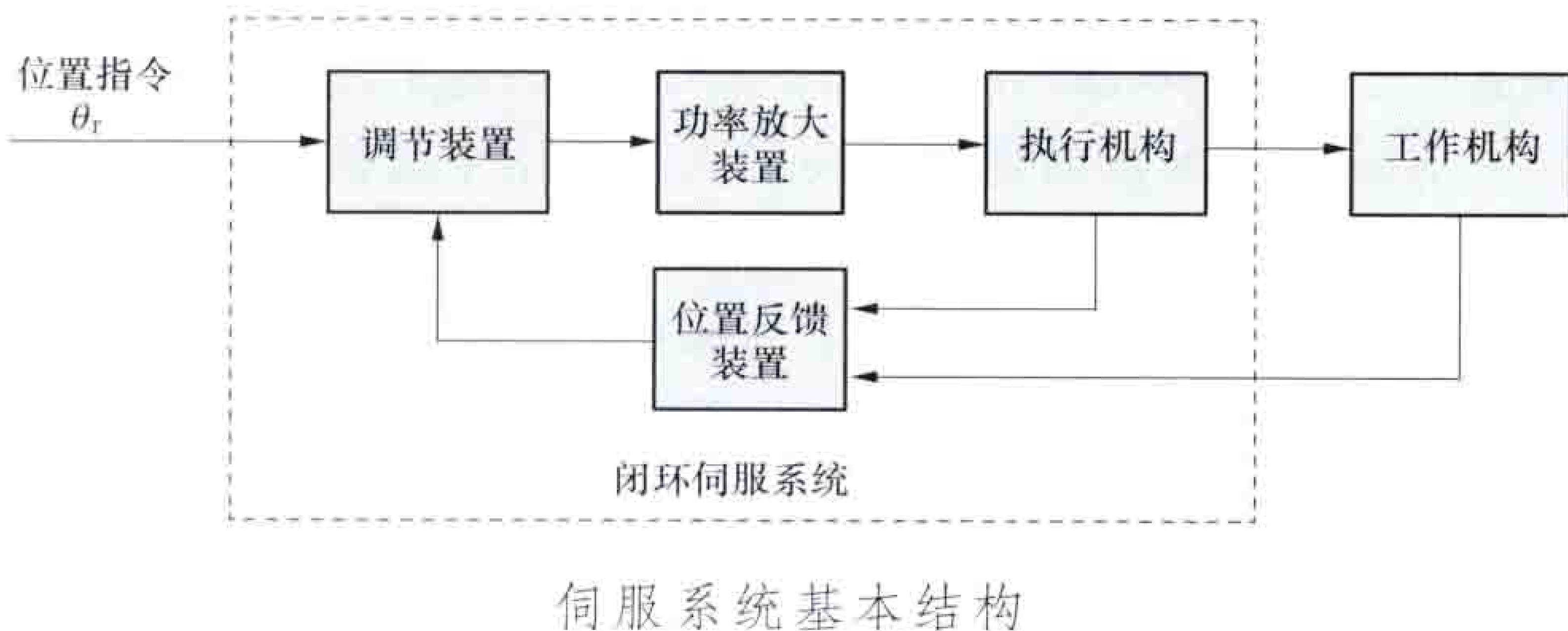
sifu xitong

伺服系统 （servomechanism） 实现输出变量精确地跟随或复现输入变量的控制系统。伺服系统最初用于国防军工，后来逐渐推广到国民经济。采用伺服系统的作用：①以小功率指令信号去控制大功率负载。火炮控制和船舰舵位控制是这种控制的典型例子。②在没有机械连接的情况下，由输入轴控制位于远处的输出轴，实现远距离同步传动。③使输出机械位移精确地跟踪电信号。记录仪表和指示仪表是这种控制的典型例子。

伺服系统按控制变量的形式不同有模拟控制的伺服系统和数字控制的伺服系统；按所用驱动元件的类型不同可分为机电伺服系统、液压伺服系统和气动伺服系统。机电伺服系统中，从机械结构上分有常用齿轮啮合传动伺服系统、消间隙齿轮传动或双电动拖动的高精度伺服系统，以及采用无齿轮系的直接传动特高精度伺服系统等。

伺服系统的根本任务是通过执行机构对位置指令信号（给定量）进行功率放大，保证有足够的能量驱动负载按指令规律运动（输出），并使输出与指令信号之间的误差尽量小，满足一定的动、静态指标。从广义来说，伺服系统的输出量可以是位置、转速、力矩、电流、温度等不同的物理量，但在实际应用中伺服系统的被控制量，如负载的位置、位移、姿态、方位等，往往都与控制系统的输出位置有关，所以通常所说的伺服系统一般是指位置伺服（随动）系统。

伺服系统由调节装置、功率放大装置、位置反馈装置、执行机构等部分构成，其基本结构如图所示。



伺服系统基本结构

衡量伺服系统性能的主要指标有频带宽度和精度。频带宽度简称带宽，由系统频率响应特性决定，反映伺服系统跟踪的快速性。带宽越大，快速性越好。带宽主要受控制对象和执行机构的惯性限制。惯性越大，带宽越窄。一般伺服系统的带宽小于 15Hz，大型设备伺服系统的带宽在 1～2Hz 以下。伺服系统的精度主要取决于测量元件的精度。因此伺服系统必须采用高精度的测量元件，如精密电位器、自整角机和旋转变压器等。也可采取附加措施来提高系统的精度，如将测量元件（旋转变压器等）的测量轴通过减速器与转轴相连，使转轴的转角得到放大，从而提高相对测量的精度。采用这种方案的伺服系统称为精测粗测系统或双通道系统。

suliao waikeshi duanluqi

塑料外壳式断路器 （moulded case circuit-breaker） 所有的零件都安装在一个用模压绝缘材料制成的外壳内，能接通、承载以及分断正常电路条件和非正常电路条件下电流的一种机械开关电器，简称塑壳断路器。塑料外壳式断路器由灭弧室、操动机构、脱扣机构及外壳等部件组成，如图 1 所示。其特点是所有的零件都密封于塑料外壳中，辅助触点、欠电压脱扣器以及分励脱扣器等多采用模块化结构。塑料外壳式断路器（见图 2）结构紧凑、体积小、质量轻、价格低廉，操作者接触导电部件可能性小，适于独立安装，基本不需要检修，可达到零飞弧、高分断能力和高可靠性等要求。具有剩余电流保护的塑料外壳式断路器可以对剩余电流进行检测，当剩余电流值超出预期值时断开被保护电路（见剩余电流动作保护器）。

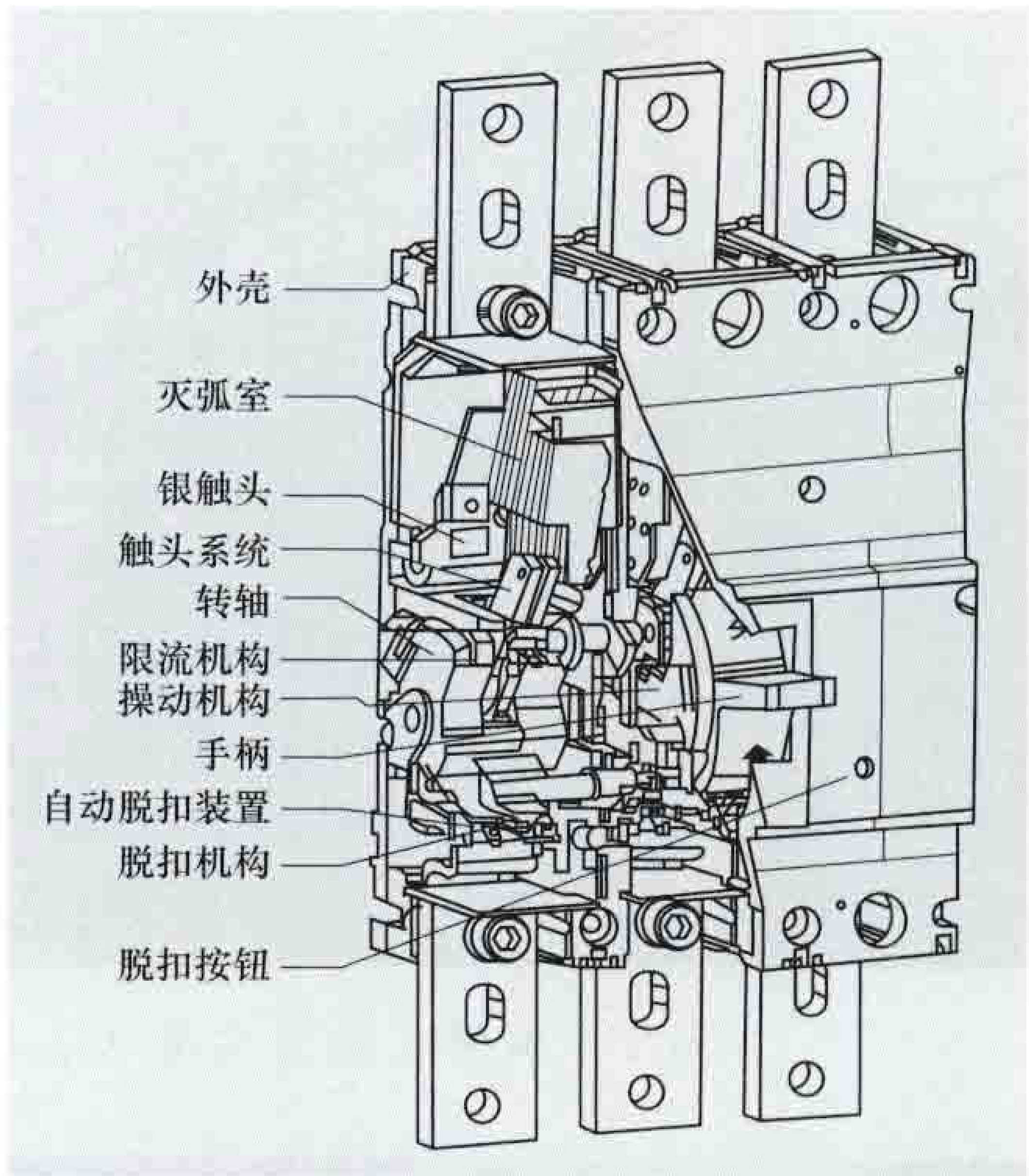


图 1　塑料外壳式断路器结构示意图

塑料外壳式断路器的脱扣器有热-磁脱扣器和电子脱扣器两种。热-磁脱扣器中的热脱扣器由双金属片、热元件和执行元件组成，当电路过载时双金属片受热弯曲，推动牵引杆使断路器脱扣；热-磁脱扣器中的电磁脱扣器采用拍合式结构，由铁芯和衔铁组成，在短路来临时由衔铁推动牵引杆使断路器脱扣。电子脱扣器又称智能脱扣器，以微处理器为基础，采用数字电路实现保护功能多样化，并具有通信功能。



图 2　塑料外壳式断路器外形

suodao diankong xitong

索道电控系统 （electric drive control system for aerial ropeway） 用以实现索道运输的电力拖动和控制等电路组合的整体。索道是沿架空钢索运动的有轨运输设备，如图 1 和图 2 所示。索道按照运行方式分为往复式和循环式索道；按照用途分为客运和货运索道；按照架空钢索数量分为单线和多线索道；按照运载容器（车厢、吊箱、吊椅或矿车）进入站房后是否从钢索上脱开，又分为固定抱索器和活动抱索器索道。索道驱动机一般都配置在站房内。索道的特殊形式是将驱动机配置在车厢内：①自行式索道（rope monorail），它是以柴（汽）油机作为原动机驱动油压泵，以液压传动方式使吊厢沿钢索运行；②空中客车（aerobus）。索道主要由驱动系统、支架、钢索系统、运载容器和站房等组成。驱动系统包括牵引电动机和机械传动装置等。支架通过托索轮支持钢索系统。单线索道的钢索既是运载容器的牵引索，又是运载容器的承重索；多线索道中的

一根（或两根）钢索是牵引索，另外一根（或两根）钢索是承重索。运载容器通过抱索器和牵引索相连接，通过行走机构悬挂在承重索下边，在牵引索的牵引下沿着承重索行走。



图 1　车厢式旅游索道（丛林　摄）



图 2　吊椅式旅游索道（丛林　摄）

索道被广泛用于丘陵、山区的货运、客运或滑雪场的人员与物资运输，水利工程常用它运送土石方和浇灌混凝土大坝，其在林区应用也很普遍。

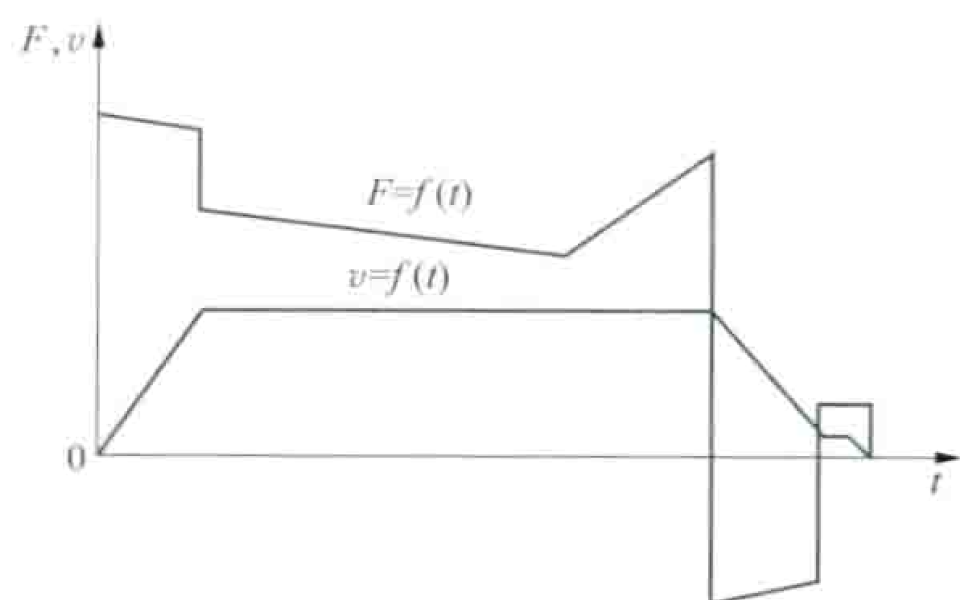


图 3　往复式客运索道无中间支架时的典型速度图和力图

索道运行有加速、等速和减速三个阶段，驱动系统的牵引力也做相应变化。典型的、没有中间支架的索道速度图和力图见图 3。索道在运行时虽然受钢索弧垂的影响，但仍被作为具有恒转矩负载特性进行控制。

索道电控系统主要由电力拖动系统、控制系统、安全保护系统和信号系统组成。

电力拖动系统　电力拖动系统的类型与索道的类型、运行速度及电动机运行方式有关。按电动方式运行的货运索道和运行中不调速的循环式客运索道，一般采用绕线转子感应电动机传动系统。具有制动方式运行的货运索道和往复式客运索道，一般采用直流电动机传动系统。运行当中或减速阶段具有制动方式运行的货运索道，也有采用带能耗制动的交流绕线转子电动机传动系统的。调频调速感应电动机传动方式在索道电力传动中也得到了应用。

电控系统　现代客运索道电控系统已完成向电子计算机控制的转变。索道电动机有时按电动方式运行，有时按制动方式运行。无论是何种方式，电控系统均能满足：①适应最大不平衡负荷时的安全可靠运行和检查钢索时的低速及反方向运行；②加、减速度要平稳；③在各种运行方式下都能按照规定的速度图运行。

往复式和运行中需要调速的循环式客运索道，均有速度自动调节系统。该系统由速度反馈和电流反馈的双闭环模拟自动调节系统组成。

往复式客运索道控制系统的行程监控器，直接影响整个电控系统的安全和控制性能。行程监控器由各自独立的机-电式与电子式双重行程监控器组成，并配备测速发电机，同时对行程和速度进行监控。机电式行程监控器主要由凸轮机构和位置开关等组成；电子式行程监控器主要由脉冲发生器和数字处理器等组成。

安全保护系统　任何形式的索道，其安全保护系统具备的功能包括：①平衡钢索张力的重锤箱越位时，作用于紧急停车；②电动机的过负荷、短路和失压保护；③直流电动机驱动的弱磁保护；④各工作岗位有紧急停车控制按钮；⑤大风报警装置；⑥可靠的防雷和防高电位引入站房的防止过电压保护。

客运索道配备的辅助驱动机，主要用于救护，其原动机可以用电动机（有备用电源时）或柴（汽）油机。

往复式客运索道还具有下列保护：①车厢到位停车后不能再向原运行方向接通电动机；②车厢越位和由此引起紧急制动后不能再向越位方向接通电动机。

循环式客运索道还有线路脱索保护，采用活动抱索器时还专门设置检查活动抱索器工况和定距离发车装置。

具有制动方式运行的索道，配备下述监控和安全保护设施：①直接显示运行速度的速度表。②限速保护措施，当速度超过10％和15％时应分别作用于信号和紧急停车。③不允许直接反接制动。④线路接触器与能耗制动回路直流接触器之间设联锁。⑤制动回路和测速回路设监视保护。⑥所有的索道，都设置制动器，其中，按制动方式运行的索道，要设置不同结构形式的制动器各一套，分别用于工作制动和安全制动，并且在通电时松闸，断电时紧闸；制动器松闸和紧闸与电动机的电流之间均有较好的配合关系，以防止或降低钢索“弹跳”，延长钢索使用年限，同时可以防止“倒转”。

信号系统　由音频通信和信号显示组成。信号显示以灯光和光字牌为主，辅以音响信号，用信号表示索道运行状态和发生异常现象时的原因。



teshu changsuo zhaoming

特殊场所照明 （special place lighting） 在特殊环境或场所使用的电气照明（见照明分类）。特殊场所是指非正常环境的建筑物或作业场所，如高温、低温、潮湿和有水汽、有爆炸危险与粉尘、有腐蚀性气体、振动等场所。由于这类场所对照明有特殊要求，在电气照明设计时，特别是照明器材，如灯具（见照明器）和电气附件的选择等都有别于一般场所。

高温场所照明 高温场所如冶炼、铸造、玻璃加工等车间，由于环境温度高，热量上升使天棚附近形成高温区，加上灯泡点燃时产生的热量，会加速绝缘器材老化甚至发生烧损事故。因此，这类场所要求灯具应具有良好的散热性能，以降低自身的发热量，灯具的灯头和配线均应选用耐热产品；布置时，灯具应尽量设置在温度较低的位置，镇流器也应与灯具分开安装。

低温场所照明 在低温场所如环境温度在－60～5℃时，光源的光输出和启动特性都有别于常温条件。

低温对光输出的影响 低温对白炽灯的光输出没有影响，对高压气体放电光源的光输出也几乎没有影响，但对荧光灯光输出影响较大，如环境温度为25℃时的光输出为100%，10℃时则下降至90%，0℃时下降为80%。

低温对启动特性的影响 白炽灯在低温下可瞬时点燃，启动电流要比常温时高；荧光灯在5℃以下启动困难，必须使用二次电压高的特殊镇流器，以在低温下启动；气体放电灯在低温下的启动特性更差，当温度为－30℃时多数无法启动。另外，由于环境温度低，灯具还可能结露、结冰，而且水或冰浸入灯具会使绝缘性能降低。所以，低温场所的照明，如0℃以下的冷冻库照明宜采用白炽灯，一般冷库可采用荧光灯或低功率高强度气体放电灯；应选用防潮型灯具和气密性开关；镇流器不宜设在低温场所。

潮湿和有水汽场所照明 在含有大量水蒸气的场所和潮湿的场所，如浴室、食品车间、制药车间、电镀车间以及用水冲洗的隧道、车辆清洗场、游泳池等场所容易出现照明器件绝缘不良、接触不好以及锈蚀等现象，甚至会引起事故。这类场所的照明应根据场所的潮湿和水汽程度，选用相应防水型灯具。

防水型灯具按防护等级分为防滴、15°防滴、防淋水、防溅水、防喷水、防猛烈海浪（强力喷水）、防浸水、防潜水8类。这类灯具的防护等级用IPX□表示。方框中数字代表分类等级。如经常用水冲洗的隧道或车间应选用防喷水型IPX5级；游泳池边有被水淹没可能的应选用防浸水型IPX7级；在喷水池内水下照明灯应选用防潜水型IPX8级等。在环境相对湿度为90%以上的场所，应选用相应防湿型灯具。

有爆炸危险与粉尘场所照明 环境内因存在有爆炸或燃烧危险的气体、液体、蒸气以及粉尘等物质，只要有火源（明火、炽热体、电弧、电火花、金属撞击产生火花等）就会引起爆炸或燃烧。爆炸性物质分为三类：Ⅰ类，矿井甲烷；Ⅱ类，爆炸性气体和蒸气；Ⅲ类，爆炸性粉尘纤维。

爆炸性气体及可燃蒸气与空气混合成爆炸性气体的场所，按照这种爆炸性物质出现的频度、持续时间和危险程度划分为0级区、1级区和2级区三个级区。0级区最危险，指在正常情况下爆炸气体混合物会频繁出现或长时间存在的场所；1级区指在正常情况下爆炸性混合物有可能出现的场所；2级区指在正常情况下不会出现危险，仅在不正常情况下才会出现危险的场所。0级区一般不能设置灯具，1级区选用隔爆型灯具，2级区可用隔爆型或增安型灯具。

存在爆炸粉尘如铝粉、镁粉、合成树脂粉、小麦粉等的场所，按危险程度分为两个区，即10级区和11级区。10级区指在正常情况下可能频繁出现或长时间存在爆炸粉尘或纤维与空气混合物的场所。11级区指仅在不正常情况下偶尔出现爆炸危险的场所。二者均应选用防尘密闭型灯具。

有腐蚀性气体场所照明 含有酸、碱、盐等腐蚀性气体或溶液的场所，如工厂的腐蚀性气体对灯具腐蚀严重，绝缘及充电器件因腐蚀会引起绝缘和接触不良，使灯具和器件因锈蚀造成维修困难甚至损坏。这类场所应选用由耐腐蚀材料如玻璃钢、强化树脂、不锈钢等或涂有耐腐蚀物质的材料制成的密闭灯具。

振动频繁场所照明 振动频繁的动力车间、冲压车间与通行重载机动车的桥梁的照明，若使用无振措施的照明灯具，因频繁振动会使灯具接触不良，甚至发生光源或灯具掉落事故。这类场所的照明灯具应使用耐振型光源与灯座，灯具安装时应有防振措施，如使用耐振装置、挠性配件、止振配件以及防松装置（采用双螺母与涂料固封等）。

tiaoguang zhaoming kongzhi

调光照明控制 （dimmer lighting control） 对光源亮度强弱变化的调节。通过改变输入电压或施加一个控制信号调节照明装置的亮度、色温和颜色。调光照明控制种类很多，一般分为手动型和自动型。

手动调光照明控制 需要人为地操纵开关发出信号，改变照明装置的输入参数来调节照明装置的亮度、色温等，分电压型和信号型两种。

手动电压型调光照明控制 需要人为地操纵开关改变热辐射光源的输入电压，达到调整光源亮度和色温的目的。按控制原理可分为电容串联型、二极管串联型、电阻串联型、自耦变压器型、晶闸管型和晶体管型等。

（1）电容串联型调光。如图1所示，它是通过电容C的降压作用来改变光源的输入电压，从而改变光源的亮度。

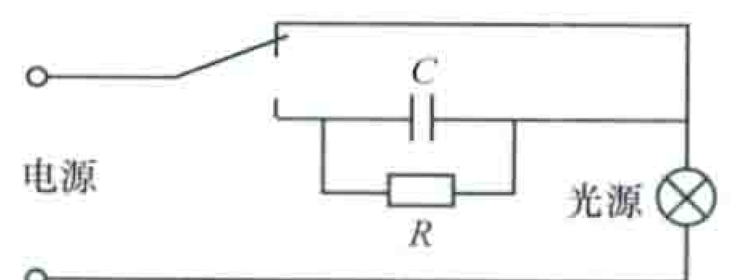


图1 电容串联型调光原理

（2）二极管串联型调光。

如图2所示，它是利用二极管V的半波整流作用来降低光源的输入电压，达到改变光源亮度的目的。

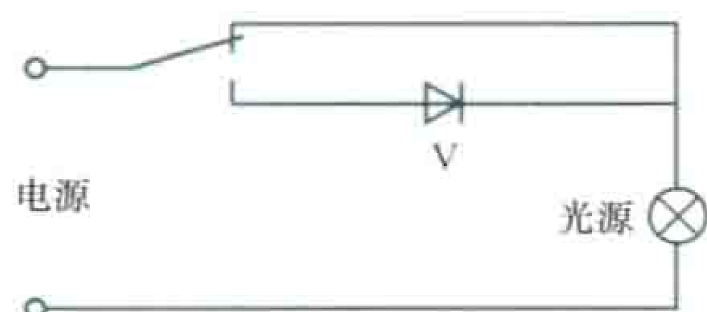


图2 二极管串联型调光原理

(3) 电阻串联型调光。如图3所示，它是利用电阻R的分压作用来改变光源的输入电压，从而改变光源的亮度。

(4) 自耦变压器型调光。如图4所示，它是利用自耦变压器T一次绕组线匝比的可调性来改变光源的输入电压，从而改变光源的亮度。

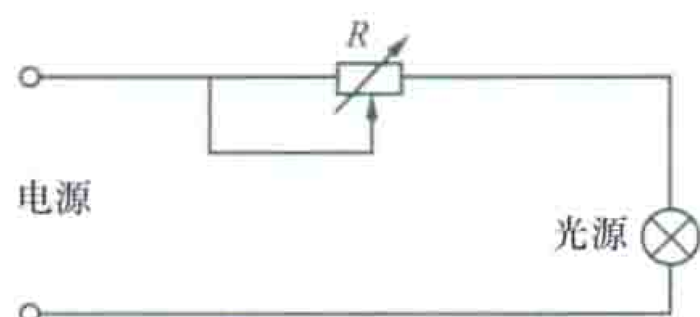


图3 电阻串联型调光原理

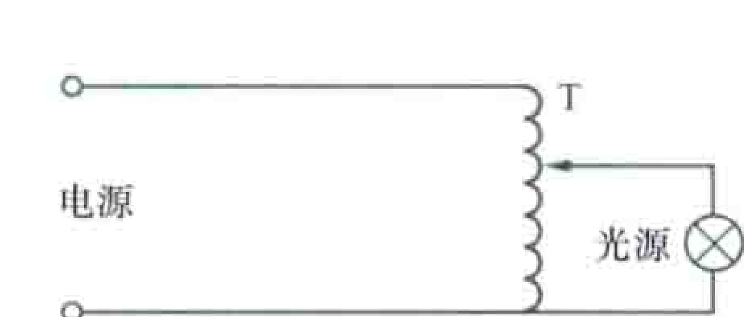


图4 自耦变压器型调光原理

(5) 晶闸管型调光。如图5所示，它是通过调整电位器电阻R_W来改变双向晶闸管的导通角，从而达到改变光源的输入电压，调整光源亮度的目的。

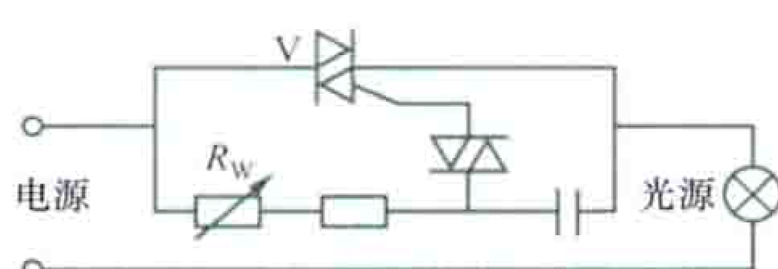


图5 晶闸管型调光原理

(6) 晶体管型调光。如图6所示，它是通过调节R_W来改变晶体管V的输入脉冲信号的宽度，从而改变光源的输入电压，达到调整光源亮度的目的。

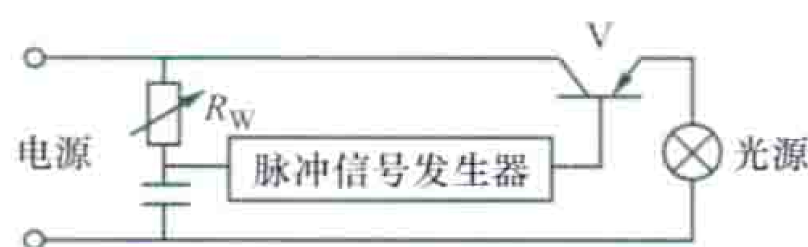


图6 晶体管型调光原理

手动电压型调光照明控制操作方式有旋转、拨动或推动式，按动或轻触式，遥控式几种。其中按动或轻触式采用按动按钮开关或轻触微动开关，这种开关一般需要在调光开关基础上增加相应的控制回路，以完成调节元件值或改变光源输入电压之功能。而遥控式则用于远距离调光，主要装置包括由发射机、接收机和调光开关，如图7所示。人工操纵发射机发射出一个或一组信号，接收机将接收到的信号放大整形后通过调光开关来调整光源的亮度。遥控调光方式很多，常见的有无线电遥控、红外线遥控等。无线电遥控是采用不同频率、不同调制方式的无线电载波信号来实现远距离调光控制的；用于近距离的红外线遥控调光，需要有一个远红外线发射源，其调光的过程由发射机发出的信号所决定。

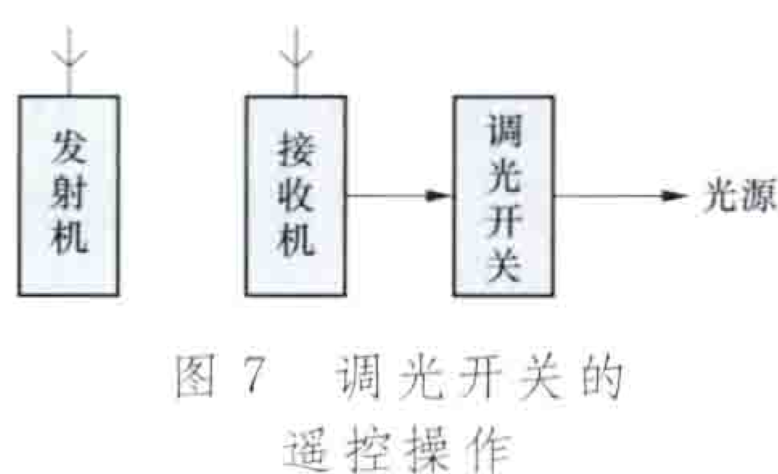


图7 调光开关的遥控操作

手动信号型调光照明控制 需要人为地操纵开关发出信号，通过电子线路改变气体放电光源的输入电源频率，达到调整气体放电光源亮度的目的，如图8所示；或通过电子线路改变发光二极管灯的输入电压达到调整发光二极管灯的亮度、色温和颜色的目的。

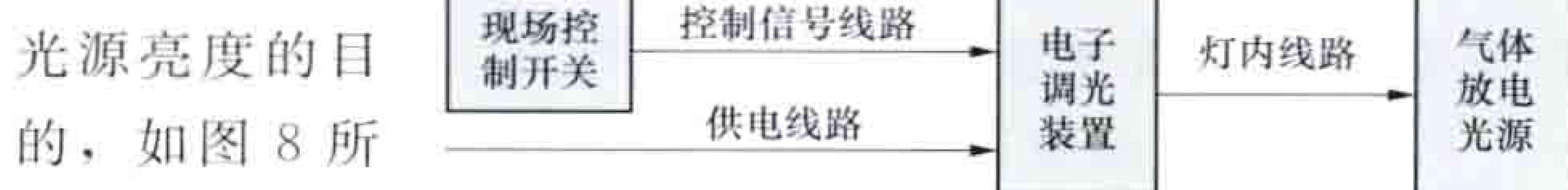


图8 气体放电光源的调光

自动调光照明控制 利用传感器、运算放大器识别分析电路，取代手动调光的手动部分，用有关物理量的变化来直接控制照明强度和光源的启闭。它可分为感应、定时和智能化调光3种。

(1) 感应调光。按人为规定的照明标准，随时监视场所照明环境参数，自动调整照明装置的开关、亮度和颜色等，是把感应照明控制与调光技术合为一体的照明控制系统。

(2) 定时调光。按人为规定的照明时间和顺序，对照明装置或照明系统的工作特性进行的亮度和色调的调节控制，是定时照明控制和调光技术合为一体的照明控制系统。

(3) 智能化调光。充分利用数字网络技术，控制任意回路连续调光；可预先设置多个不同场景，在场景切换时淡入、淡出；可接入各种传感器；可根据手持遥控器的指令自动调整；可系统联网实现总体监控。多用于酒店、高级寓所、多功能厅、歌舞厅等，以灯光的变化制造出各种不同气氛的环境。例如广州亚运会主会场即采用了智能化调光，见图9。


图9 广州亚运会主会场智能化调光夜景（第16届亚洲运动会于2010年11月12～27日在中国广州举行）

tiaoyaqi

调压器

调压器 (voltage regulator) 利用电磁感应原理，在一定范围内调节输出电压的电器。调压器用于需要调节电源电压的电器和设备中，按电流性质分为交流调压器和直流调压器，按结构分为机电式调压器和静止式调压器。

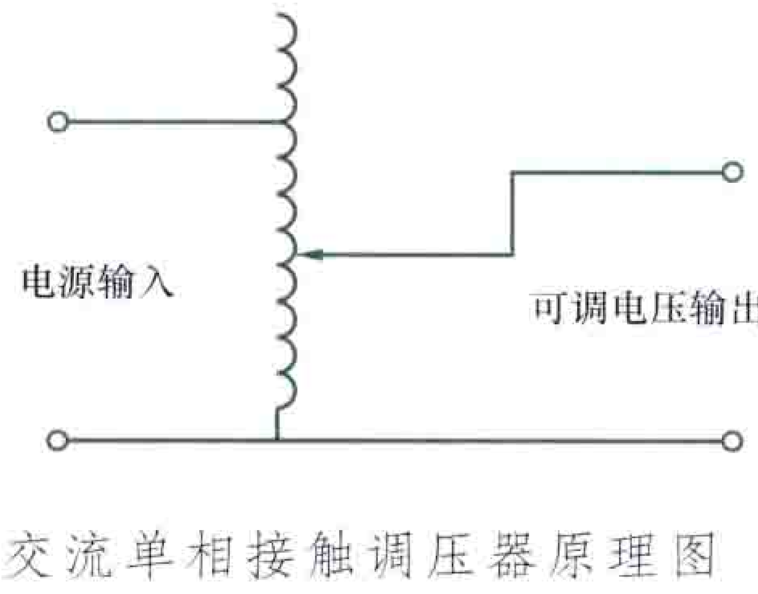
随着电子技术、自控技术的发展和计算机的应用，利用晶闸管开关制成的晶闸管交流电力控制器（包括晶闸管调压器、晶闸管调功器），在很多场合（如调光、控温）替代了传统形式的调压器，特别是作为成套自动控温装置在热加工中得到广泛的应用。此外，利用晶闸管开关、计算机控制技术，加上传统的变压器，经有机组合制成的晶闸管开关稳压器，作为无机械传动、无触点控制、高速高效的稳压电源已开发成功并得到推广应用。

机电式调压器 调节过程中需用机构来进行传动的调压器。交流机电式调压器又分为接触调压器、感应调压器及移圈调压器。

接触调压器通过改变由石墨制成的电刷（也称碳刷）的滑动接触位置，改变自耦线圈中公共线圈和串联线圈的匝数比，达到调压的目的，原理如图所示。接触调压器的调压范

围广，波形特性好。其输出电压的波形为正弦波，但若电刷滑动接触过程中流过很大的电流，会造成电刷温度过高，因而接触调压器的功率不能做得很大。单相接触调压器的功率一般在十几千伏安以下。

感应调压器是一种无接触电刷的交流调压器，实质上是制动状态下的绕线转子感应电动机，定子绕组为其一次线圈，转子绕组为其输出二次线圈，通过改变定子与转子间的相对角位移来改变一、二次线圈间感应电动势的相位（三相）或输出电压幅值（单相），从而达到改变输出电压值的目的。交流感应调压器分为单相式和三相式，由于无电刷，容量可以做得较大，高达几百千伏安，但输出波形有畸变，波形失真较大。



交流单相接触调压器原理图

移圈调压器是通过移动一个自身短路的并可上下移动位置的线圈，来改变一、二次线圈间的耦合磁链，从而实现调节输出电压的目的。移圈调压器的功率可做到几百千伏安。同样，其输出电压波形失真度较大。

静止式调压器　分为磁性调压器和半导体调压器。

磁性调压器是用交流磁性电抗器与负载串联，借调节磁性电抗器的电抗值来实现调节输出电压的目的。磁性电抗器的两个铁芯上分别绕有交流线圈和直流线圈，借改变直流励磁电流的大小来改变铁芯的磁导率，从而改变交流线圈的电抗值，使输出电压值改变。磁性调压器的输出电压波形差，有较多的谐波分量，体积大，质量重；优点是过载能力强，结构简单，工作比较可靠。

半导体调压器分为晶体管调压器和晶闸管调压器。晶体管调压器的工作原理与晶体管稳压电源相似，由于晶体管的输出功率不大，故晶体管调压器的输出功率受到了限制，其输出电流在几十安以下。晶闸管调压器的基本工作原理是用两只反并联的晶闸管（或用一只双向晶闸管代替）串联在电路中，通过改变触发晶闸管控制极的触发脉冲相位来改变输出电压平均值的大小，实现电压的调节。晶闸管的功率可以做得较大，因此晶闸管调压器的输出功率也可以做得较大。晶闸管调压器的体积小，质量轻，但波形严重失真，谐波分量较大，采用晶闸管调压器时，需用特殊技术处理以改善波形。

tielu xinhao

铁路信号　(railway signaling)　利用特定物体（包括灯）的颜色、形状、位置、数目或音响等向铁路行车人员传达有关列车运行条件、行车设备状态及行车的指示和命令等信息的控制技术。铁路信号是保障列车运行安全、提高运输效率、改善铁路员工劳动条件的一种现代化技术手段。铁路信号是信号、闭塞、联锁、列车运行控制系统、行车指挥自动化系统、编组站自动化系统的总称。

信号　通过信号设备向铁路行车人员和列车发出的有关指示和命令。

信号分类　铁路信号按人的感觉可分为视觉信号和听觉信号。视觉信号是以物体（包括灯）的形状、颜色、位置、数目等特征来显示命令内容。听觉信号是利用号角、笛、响墩等音响特征表示命令内容。按信号功能可分为行车信号和调车信号。行车信号用于指挥列车运行；调车信号用于指挥调车作业。按显示制式可分为选路制信号和速差制信号。选路制信号是用臂板位置或灯光颜色特征、数目来表示列车允许速度。速差制信号是用臂板位置或灯光颜色特征、数目来表示列车允许速度。

信号设备　主要指设置在地面的信号机。信号机按结构可分为臂板信号机和色灯信号机。臂板信号机是在机柱上装设长方形或鱼尾形臂板，昼夜以臂板的位置、形状、颜色等特征显示命令内容，多用于无可靠交流电源地区的车站。色灯信号机以灯光的颜色、数目、亮灯状态（稳定或闪光）和灯列位置等特征显示命令内容。其基本颜色：红色——停车；黄色——注意或减低速度；绿色——按规定速度运行。色灯信号机昼夜显示，需要有可靠的电源供给。色灯信号机按结构特点可分为透镜式色灯信号机、探照式色灯信号机和LED色灯信号机。透镜式色灯信号机灯泡发出的光线，通过两层阶梯形透镜，经折射和着色后平行射出。这种信号机的一个灯具只能给出一种色光，所以一架信号机要有多个灯具。探照式色灯信号机灯泡发出的光线，经过装于机具后部的椭圆球面反射镜反射，并经色玻璃框着色和透镜折射后射出。这种信号机的色玻璃框用继电器控制，灯光颜色可以变换，所以只有一个灯具就可以给出红、黄、绿3种颜色。LED色灯信号机的发光单元为发光二极管，相比透镜式色灯信号机具有可靠性高、寿命长、节能的优点。

信号机按设置地点和用途可分为固定信号机和移动信号机。固定信号机有主体信号机（主要有进站信号机、出站信号机、通用信号机、遮断信号机、进路信号机、调车信号机、防护信号机、驼峰信号机等）、辅助信号机（主要有预告信号机、复示信号机、驼峰复示信号机等）和附加信号机（主要有引导信号机和容许信号机等）；移动信号机主要有停车信号机、减速信号机和减速终了信号机等。

信号表示器一般设于信号机上或线路两侧，主要有发车表示器、调车表示器、进路表示器、发车线路表示器、道岔表示器、脱轨表示器、车挡表示器、水鹤表示器等。

闭塞　使列车之间保持一定空间间隔安全运行的方法。闭塞方式主要有半自动闭塞、自动闭塞（固定自动闭塞）和移动闭塞。

半自动闭塞　两站间由车站值班员通过闭塞机办理闭塞和接发车作业，开放信号。列车从发车站出发后，出站信号机自动关闭。列车到达接车站，经车站值班员确认列车完整到达，办理到达复原手续，才能解除区间闭塞。

自动闭塞　现代化铁路的一种区间自动控制技术。它对保证行车安全，提高区间通过能力起到显著作用，是一种较先进的闭塞方式。

自动闭塞（见图1）是把两车站间的线路划分成若干个小区间，称闭塞分区。每个闭塞分区的始端一般设有通过信号机，各闭塞分区都设有轨道电路，用以检查闭塞分区的占用情况。列

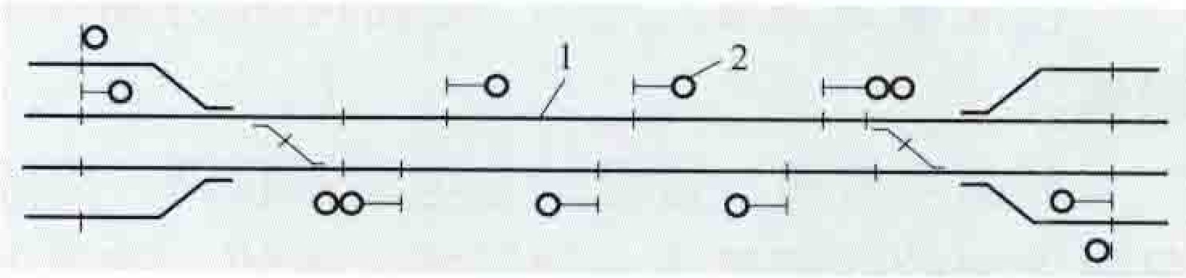


图1　自动闭塞示意图

1—闭塞分区；2—通过信号机

车进入闭塞分区后，防护该闭塞分区的通过信号机自动亮红灯，禁止后续列车进入，该分区处于闭塞状态；而当列车驶出闭塞分区时，防护该闭塞分区的通过信号机自动地变为允许显示，闭塞分区转为开通状态。自动闭塞对列车的防护是自动进行的，而且两站间在满足列车安全运行的条件下允许开行追踪列车，从而可以增大列车密度，提高线路通过能力。

自动闭塞用电属一级负荷（见用电负荷级别），通常采用图2所示的供电方式。图中自动闭塞采用10kV高压供电线路，每隔40～70km为一个供电臂，供电臂两端分别设有自动闭塞变电所，相互可逆供电。在供电臂的适当地点设有电力变压器，一般区间每供电点设一台电力变压器，车站设2台电力变压器。由于供信号用电的电力变压器容积较小，故可采用杆式变电台。

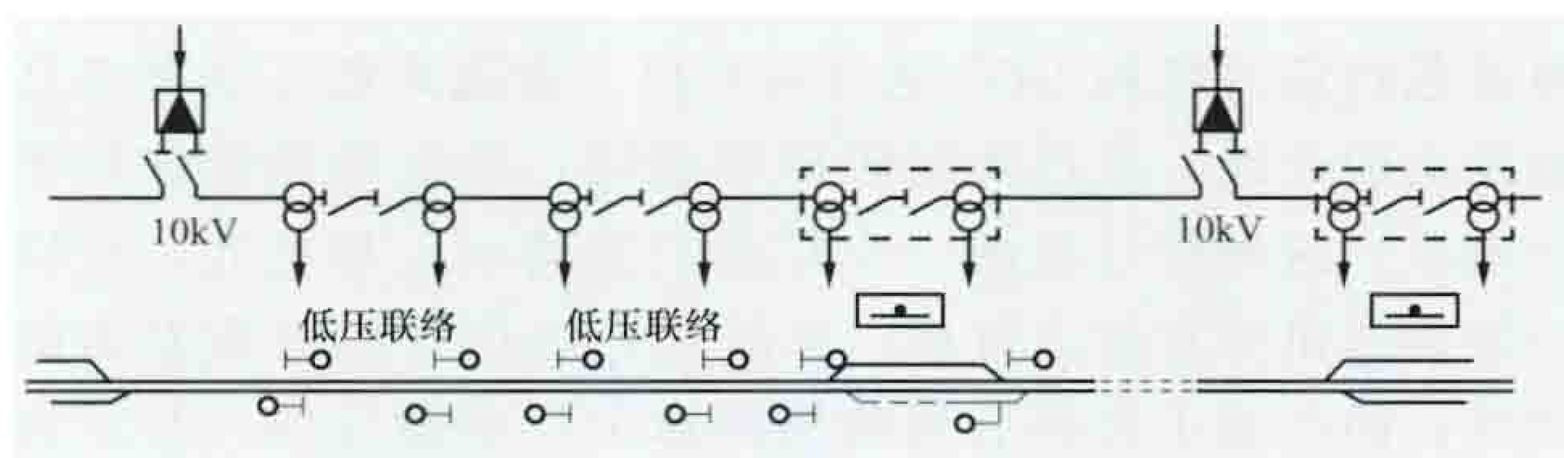


图2　自动闭塞供电方式示意图

在区间的电力变电台上，设有低压联络箱，箱内装有低压保护装置。信号电源由低压联络箱通过低压电缆引至信号继电器箱。

自动闭塞区段小站电气集中的室内信号设备供电取自自动闭塞电力线，一般由2台电力变压器供电，一台主用，一台备用，自动切换。该变压器设在相距4m的H型杆式变电台上，每根电杆上设有一个低压配电箱，箱内有变压器的低压保护装置。信号电源从低压配电箱通过两条低压电缆引至车站继电器室的小站电源屏。小站电源屏的供电电源是单相交流电源，容量一般为2.5kV·A。

为了提高供电的可靠性，自动闭塞采用互相独立的双回路供电方式，其中一路为信号专用供电线路，另一路备用，两路电源倒闸时间不超过0.6s。在电气化区段，自动闭塞供电容量约为0.8kW/km，在非电气化区段为0.5kW/km。铁路信号轨道电路普遍采用25Hz交流供电。

移动闭塞　根据列车的相互位置和速度，设置移动的闭塞区间，以保证前行列车与后续列车之间有恰当的空间间隔。此方式可以在保证行车安全的前提下提高行车密度。

联锁　利用机械和电气等技术，使车站范围内的信号机、进路和道岔相互间按照一定程序并满足一定条件才能动作的制约关系。根据信号机的显示列车或调车向某一进路运行，只有当进路上的道岔位于进路所要求的正确位置，防护该进路的信号机才能开放；信号机开放以后，该进路的道岔便被锁住不能再转换，允许列车驶入。列车驶入进路后，防护这条进路的信号机立即关闭，显示红灯，不允许其他车辆再驶入。

按操纵道岔的方式，联锁可分为集中联锁和非集中联锁。

非集中联锁　常见的为电锁器联锁，指道岔、进路和信号机之间的联锁是由电锁器来实现的，道岔由扳道员在现场分散操纵。

集中联锁　通过轨道电路检查线路区段占用情况，由车站值班员在控制室集中控制信号机和道岔，直接指挥全站的列车和调车作业。集中联锁包括继电联锁和计算机联锁。

继电联锁通常由继电逻辑电路来实现联锁。

计算机联锁由计算机完成联锁逻辑运算来实现联锁。系统功能上可替代继电联锁，并具有远程诊断、存储、记录、监测和报警等功能，适用于大、中、小站。系统还可通过光缆通信，实现远程控制。它有双机热备式、三取二式、二乘二取二式3种形式。双机热备计算机联锁系统是分布式多微处理器系统，由STD总线、I/O信息采集和输出驱动模块构成。三取二式计算机联锁系统采用三重冗余容错技术实现车站计算机联锁。二乘二取二计算机联锁系统采用两套联锁机，每套设置双CPU的方式满足“故障-安全”要求。

集中联锁的主要用电负荷有信号机、轨道电路、电动转辙机、控制台和控制柜等。大站电气集中联锁属一级负荷，信号楼应有两路独立的昼夜不间断供电的一类电源。为保证不间断供电，两路电源不能同杆合架，两架空线路之间距离要大于倒杆高度，主备电源变压器一般分设在两个变电台杆上，每一路电源容量都应负担全部负荷，两路电源均引入大站电源屏。电气集中联锁设备所需各类低压电源均由电源屏提供。大站电源屏由交流屏、调压屏、转换屏和直流屏组成。转换屏用于直接引入两路三相四线交流电源，并能进行自动或手动切换，自动切换时间不大于0.15s，还用于给各类设备提供所需要的交、直流电源；调压屏用于稳定三相交流电压。

列车运行控制系统　一般由地面-车上信息传输和信息处理系统构成。车载设备把从地面获得的允许速度信息与列车实时采集的实际车速相比较，在超出规定的允许车速时，控制系统根据列车的制动性能、实际载重和目标速度等多种因素，求得最佳降速方案，或在需要时进行制动。

根据信号显示具备自动加速功能的系统称为列车自动操纵或列车自动驾驶系统。它是一套完整的闭环自动控制系统，还设有列车自动门等辅助性操作。20世纪末，列车自动驾驶系统已在城市轨道交通中采用。

行车指挥自动化系统　以计算机为基础的在线实时监测控制系统。该系统用于铁路行车调度指挥，实现对枢纽和调度区段中列车运行情况的集中监视，对车站道岔、信号机等设备的集中控制，以及对车站联锁设备和闭塞设备工作状态的集中监视。由调度监督系统、调度集中系统和计算机辅助行车调度系统组成。

调度监督系统　行车调度员利用该系统对管辖范围内的铁路沿线信号设备状态和列车运行状况进行集中监视。

调度集中系统　行车调度员利用该系统在调度中心远程控制和监视所管辖范围内的铁路沿线信号设备，指挥列车运行。调度集中系统按应用场所分为区段调度集中、枢纽调度集中和分界口调度集中。

计算机辅助行车调度系统　与铁路调度集中、调度监督系统结合使用，实现列车运行实迹的实时自动记录、显示和描绘，实现阶段计划运行图的自动生成、显示、修改和优化，从而使铁路行车调度员从繁忙的工作中解脱出来。

编组站自动化系统　在驼峰调车场上，控制货车溜放进路和溜放速度，实现列车的自动分点解体和编组的自动控制系统。编组站自动化系统属于一级负荷，应由两路电源供电，并设专用的驼峰变电所。在每路电源上都设2台变压

器，其中一台供信号用电，另一台供空压机或油压机站、峰顶照明等用电。该系统主要由驼峰货车溜放速度自动控制、驼峰货车溜放进路自动控制、驼峰推进机车速度自动控制和驼峰信息处理等系统组成。

驼峰货车溜放速度自动控制　用车辆溜放调速设备来调整车组的溜放速度，使前后相邻车组间保持必要的间隔，并在溜入编组线后与停在编组线上的车组安全连挂。货车溜放速度控制有人工控制和自动控制两种方式。自动控制是由计算机根据现场测重、测阻、测长和测速等测量设备测得的每个车组的质量、阻力、所要溜入股道的空闲长度以及实际溜行速度等参数，使之在驶至停车点与停留车连挂时，不超过允许速度。调速设备有点式（车辆减速器）、连续式（减速顶、减速顶加绳索牵引小车）和点-连式 3 种控制方式。编组线前部采用点式控制，后部采用连续式控制。

驼峰货车溜放进路自动控制　根据解体作业计划，按照各溜放车组的去向股道，自动快速转换道岔，排列溜放进路。

驼峰推送机车速度自动控制　根据车组长度及其去向股道，利用地面驼峰信号或机车信号，指示推峰机车推送速度。推峰机车亦可在峰顶使用无线电遥控。

驼峰信息处理　包括解体、编组计划的自动编制、现车管理、货车信息追踪、货车报表统计等。

发展简况　铁路信号的发展史，体现了由人工劳动向机械化、电气化、电子化、计算机化发展，从而实现半自动化、自动化的过程。1825 年，世界上第一列火车在英国运行时，引导列车前进的信号便随之出现。最初是由人手持信号旗在列车前骑马引路，随后美国又采用沿线每隔 5km 悬挂黑白两种颜色的球形固定信号，来表示接发列车、通过或停车的信息。1839 年，英国铁路开始用电报传递列车运行消息。1841 年，英国出现了臂板信号机。1843 年，英国首先采用机械集中联锁。1851 年，英国铁路用电报机实行闭塞。1866 年，美国利用轨道接触器检查闭塞区间有无机车车辆。1867 年，出现点式自动停车装置，这种装置能强迫列车在显示停车信号的信号机前停车。1872 年，美国人 W. 鲁宾逊（William Robinson）发明了闭路式轨道电路。1904 年，美国开始采用电气集中联锁。1923 年美国铁路研制了机车信号，并于 1925 年正式应用于铁路。1925 年，美国铁路协会（AAR）决定：美国各铁路、公路平交道口必须装设标准化的防护设备。以后，铁路、公路平交道口防护设备发展起来。1927 年，美国铁路采用了调度集中控制装置。1929 年，美国铁路开始使用继电式电气集中联锁。20 世纪 60 年代以来，计算机联锁、计算机辅助行车指挥自动化系统和列车运行自动控制系统在铁路上运用并得到迅速发展。

中国铁路信号技术的发展，大体可分为五个时期：1903～1910 年为铁路信号萌芽时期；1910～1924 年为发展机械信号时期；1924～1959 年为机械信号向电气信号过渡时期；1959 年以后为继电式电气信号发展时期；从 60 年代中期开始出现电子信号，20 世纪末已发展成为以电气、电子、计算机为基础的铁路信号。

tingdian

停电　(power interruption)　供电发生中断的现象。现代社会对电能的依赖性越来越强，供电可靠与否与全民社会的生产及生活息息相关，停电对国民经济造成的损失和社会影响十分巨大。DL/T 836—2012《供电系统用户供电可靠性评价规程》规定：停电持续时间大于 3min 的停电为长时停电；停电持续时间小于等于 3min 的停电为短时停电。

停电原因　供电设施遇有下列事件，都有可能引发停电：①超过电力设施设计标准的自然灾害，如地震、大风、洪水、覆冰、大雾等；②外力破坏，如车船撞断电杆电线，开山放炮炸断电线、炸坏绝缘子，小动物（如鼠、猫、蛇、鸟）造成的电气短路；③设备故障，如变压器、断路器等绝缘性能低劣引起的设备短路；④运行维护人员误操作、误整定、误接线等引起的短路或保护动作；⑤用户内部发生的事故，如因用户继电保护失灵造成断路器越级动作，引起电力系统中其他用户的停电；⑥供电设备正常检修、试验以及新用户接入电网等工作的需要；⑦因窃电或违章用电而施行的中止供电等。

停电分类　按停电性质可分为事故停电、计划停电、临时停电和依法施行的中止供电。

(1) 事故停电。突发事件引起的停电，具有突然性、持续时间的不确定性和不可预见性等特征，对用户和社会产生的影响比较严重。如供电系统遇到的突发事件有超过电力设施设计标准的大风、洪水、地震等自然灾害，供电设备质量不良造成的内部电气短路，外力破坏和用户内部事故扩大至电力系统等。图 1 为 2008 年湖南省冰雪灾害停电事故抢修现场。



图 1　2008 年湖南省冰雪灾害停电事故抢修现场

(2) 计划停电。按预先安排的计划或预案进行的停电。计划停电在实施前需通知用户，不会引起用户的直接经济损失。计划停电主要有计划检修停电，施工、业扩接电和电力供应不足时限电引起的停电等。①计划检修停电，施工、业扩接电又称为工作停电，是为了提高供电设备抵御突发事件的能力，供电系统扩建、改造及迁移，用户受电装置接入电网等引起的有计划安排的停电。虽然带电作业可以减少以上停电的次数和时间，但仍有些检修与试验项目需停电进行。②限电引起的停电，通常是依据政府发布的行政命令，在特定时段对某些用户的部分或全部用电需求进行的控制。

(3) 临时停电。为处理故障而实施的停电。供电设备在运行过程中，有时会出现故障或遇到影响安全运行的其他事件，若不及时停电抢修，可能会酿成事故，造成设备的损坏或更长时间的停电。因此，临时停电是为预防事故而不得已

采取的措施。临时停电是非计划性的停电，具有随机性，对用户的用电有一定影响。为减少因临时停电造成用户的损失，在停电前应尽可能通知有关的重要用户，尽可能采用不停电作业。

（4）中止供电。对有窃电、拖欠电费等用电行为依法进行的暂时断电。这是为保护国家的利益、维护正常的供用电秩序、保障供用电的公共安全而实施的停电。中国的《电力供应与使用条例》规定，对窃电者，可当即采取中止供电措施；对拖欠电费的，可按国家规定的程序予以停止供电。

停电损失 因电力供应不足或电力系统发生故障导致供电中断时社会所承担的全部经济损失。停电对用户正常活动或利益产生的影响度，主要取决于用户类别、停电发生的时间、停电波及的范围和停电持续的时间。突然性停电，特别是自然灾害或电气设备故障引起的停电，对社会和用户都会产生严重的影响。按照停电的影响度，用户停电损失分为直接停电损失和间接停电损失。

直接停电损失指实际发生停电时及以后一段时间内承担的损失，通常由未曾预期到的停电的短期效应所决定。一般直接反应在产品成本、性能效益以及商业、交通等社会活动中，如：生产停顿、产品质量下降、产量减少；生产设备闲置、损坏；人力资源浪费或闲置；原材料浪费或损坏；食物、药物变质；计算机信息丢失、数据交流通道的破坏；商业活动的中断和停顿；电气化运输和交通的中断和停顿等。

间接停电损失指用户为减少停电影响，调整其正常生产活动而支付的额外费用，或采用备用能源而承担的费用，通常为预期将发生停电的更长期考虑所产生的负担。如：引发社会治安秩序混乱、交通拥堵、社交活动终止等造成的损失；企业修改或推迟生产（或交易）计划等造成的损失等。

停电事例 大面积停电会对社会和经济造成严重影响。重大停电事故有美国德克萨斯州大停电、美加大停电、中国汶川地震大停电和日本地震大停电。

（1）1983年美国德克萨斯州大停电。1983年8月18日，美国德克萨斯州遭受风速达185km/h的飓风袭击，使该州电力系统中的13 000km输配电线路停运，960km配电线路被刮断，3500基电杆被刮倒（包括20基高压输电塔），造成休斯敦电灯及电力公司供电的75%用户停电，一个星期后，仍有10万用户停电。这是第二次世界大战以来，电力系统所遭受到的最严重损失的大停电。

（2）2003年美加大停电。2003年8月14日下午3时06分，美国俄亥俄州北部3条超高压输电线路突然发生故障。由于警报系统失灵，控制人员没有发现并采取有效措施，导致输电系统出现连锁反应，并在1h之内导致美国东北部和加拿大部分地区发生大面积停电，9300mile^2[1] 5000多万居民饱受了停电之苦。据估计，这次大停电使加拿大当年8月份的国民生产总值减少了0.5%。大停电直接影响到美国约1/4的地区，该地区当年国内生产总值减少1%。这是北美历史上最大范围的停电，不仅直接影响到居民的生活，还间接地影响了其他行业的生产，损失难以估计。

（3）2008年中国汶川地震大停电。2008年5月12日，中国四川省汶川县发生8.0级大地震，受地震影响，川北陇南地区电网受损严重，甘肃省电网也受到不同程度损坏，全网共损失负荷约400MW。四川省电网范围内，500kV变电站停运1座，220kV变电站停运5座，此外川西地区还有5座电厂与系统解列。与此同时，邻近的陕西省有2座220kV变电站和3台发电机停运，用电负荷减少约150万kW。

（4）2011年日本地震大停电。2011年3月11日，日本宫城县海域发生9.0级世纪大地震（见图2），并引发破坏性极高的海啸，造成福岛核事故。大地震及引发的海啸等大规模次生灾害重创日本电力系统。东京电力所属核电机组损失负荷近1200万kW，所属区域损失电源超过2000万kW，且相当一部分短期内很难恢复。地震对环东京湾火电群造成了不同程度的损失，导致日本东北地区和关东地区大面积停电，约840万用户受到影响。



图2 2011年日本大地震引发的海啸

tingdian guanli xitong

停电管理系统 (outage management system, OMS)

用于配电网停电流程管理的计算机应用系统。综合分析配电网设备信息、实时运行信息、用户信息，对故障停电、用户电话投诉以及计划停电处理过程进行计算机应用管理，能够自动确定停电范围、定位故障点，实现负荷转供、故障抢修调度、停电计划、停电统计分析等管理。其目的是加强对计划停电的管理，迅速处理故障停电，缩小停电范围，缩短停电时间，提高供电可靠性，并为故障报修应答（TCM）系统提供停电原因、恢复供电时间等信息，及时答复用户的电话咨询，提高用户服务质量。中国通常将其作为配电生产管理系统的一个应用模块来开发建设，在美国等国家，供电企业常建设独立的停电管理系统。

停电管理系统的主要功能包括计划停电管理和故障停电管理。

计划停电管理 根据计划停电的要求，制订停电计划并进行系统模拟，以最小的停电范围和最短的停电时间来确定最佳停电隔离点及负荷转移方案。通过配电地理信息系统显示停电区域，列出造成停电的用户名单，打印用户停电通知书，并将计划停电信息自动传送给故障报修应答系统。

[1] $1mile^2=2.589\ 988km^2$。

故障停电管理　在故障停电时，根据来自配电网自动化系统主站以及自动读表（AMR）系统、客户信息系统（CIS）、故障报修应答系统的停电信息，迅速判断并在配电地理信息系统地图上标示故障设备、停电范围以及受影响的用户，确定最佳故障隔离、负荷转移方案，开具抢修操作票，快速进行故障抢修；同时将停电原因、何时恢复供电等故障停电信息送入故障报修应答系统。此外，系统还记录故障发生、处理及恢复供电整个流程的信息，为故障统计、分析以及供电可靠性分析提供依据。

（1）故障诊断和定位。综合分析来自配电网自动化系统主站的保护动作、开关跳闸信息、故障点定位结果以及自动读表系统、客户信息系统、故障报修应答系统的停电信息，利用配电 GIS 单线图和网络拓扑关系，确定故障点、故障区段和故障设备。

（2）故障抢修和恢复供电。在故障定位的基础上，根据配电网自动化系统主站的故障隔离方案，确定最佳故障隔离、负荷转移方案，尽可能多地恢复用户供电。在故障抢修过程中，帮助调度员分析、安排和协调抢修队伍，下达抢修命令，以便尽可能快地恢复供电。当停电范围较大时，帮助调度员分析故障抢修的轻重缓急，优先处理最重要、最关键的抢修工作。

（3）故障信息的统计、分析和报表打印。恢复供电后，根据故障停电处理流程信息打印停电报告，包括故障地点、故障区段、故障类型、停电的发生及恢复时间、开关操作次数、受影响的用户数及每一受影响用户的负荷（或电量）损失量等。同时，对故障进行统计分析，按故障原因及故障设备进行分类统计，产生可靠的统计报表。

tongbu diandongji

同步电动机　（synchronous motor）　运行时的转速 n 与所接电源频率 f 之比为恒定值的交流电动机。电动机运行时，转速恒等于同步转速 $n_1=\dfrac{60f}{p}$，其中 p 为电动机极对数。

同步电动机在不要求调速的大功率生产机械中用得很多，包括大型空气压缩机、粉碎机、送风机、电动-发电机组等，它们的功率达数千瓦至数万千瓦。大功率同步电动机与同容量的异步电动机相比，有明显的优点：功率因数高，可以通过调节励磁电流而在超前功率因数下运行，有利于改善电网的功率因数；大功率低转速的同步电动机体积较小。

同步电动机按转子结构特点可分为凸极式（见图 1）和隐极式（见图 2）两种，一般都做成凸极式。如按磁极固定位置分，有磁极固定在定子上的旋转电枢式（转子上嵌套三相交流绕组，经过转轴上的集电环及电刷与外电路接通）和磁极固定在转子上的旋转磁场式，一般多做成旋转磁场式。同步电动机的磁极一般由直流电流励磁；也有用永磁体的，称为永磁同步电动机。

不带机械负载，只向电网提供或吸收无功功率，运行于电动机状态的同步电动机称为同步调相机或同步补偿机，用于改善电网功率因数，维持电网电压水平。

基本结构　同步电动机由定子和转子两大部分组成，它们之间是气隙。在旋转磁场式同步电动机中，定子部分主要有机座、定子铁芯和电枢绕组（即定子绕组）。机座的作用是固定定子铁芯，因此必须有足够的刚度和强度。定子铁芯由 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成，内圆开有槽，槽内放置线圈，这些线圈按一定规律连成电枢绕组。转子如做成凸极式，气隙在两相邻磁极之间处比磁极中心处大得多。磁极铁芯由钢板冲成冲片后，叠压而成。磁极上套有励磁线圈，各励磁线圈串联起来，构成励磁绕组，在励磁绕组中通入直流电流，产生 N、S 极交替排列的磁极。转子如做成隐极式，则转子是一个圆柱体，气隙沿圆周是均匀的，在转子铁芯外表面圆周上开有许多槽，励磁绕组分布地嵌放在这些槽内。励磁绕组的引出线分别与两个集电环连接，通过电刷与直流电源相接。

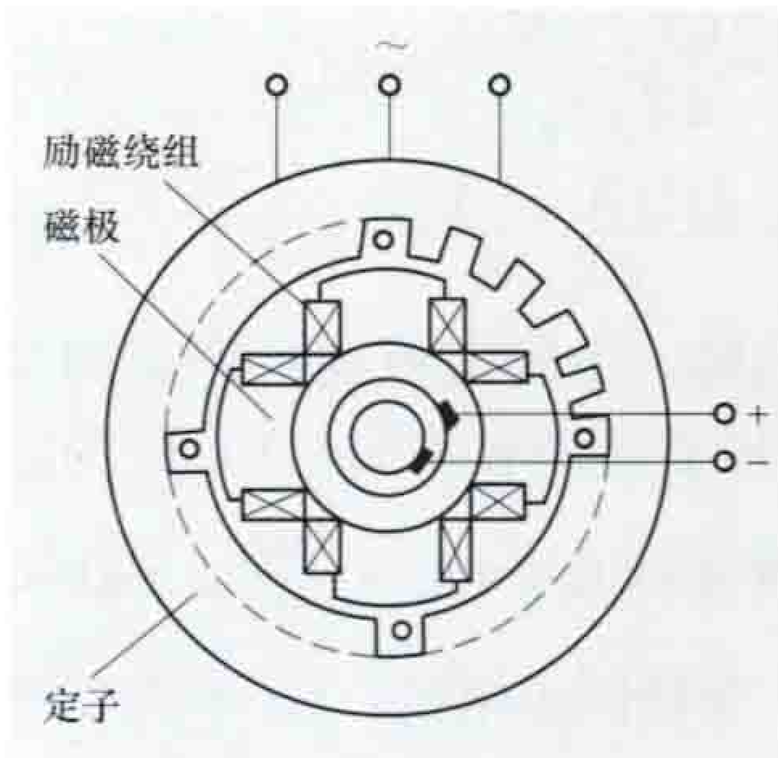


图 1　凸极式同步电动机的结构示意图

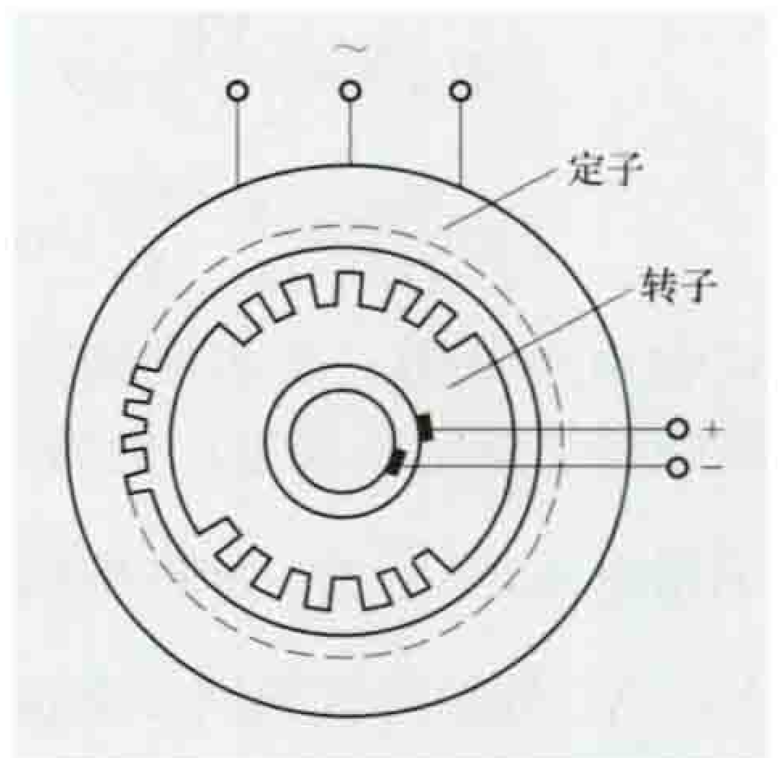


图 2　隐极式同步电动机的结构示意图

旋转电枢式同步电动机的定子是磁极，转子是电枢。

同步调相机的结构与同步电动机基本相同，只是由于不带机械负载，转轴可以细些。如果它具有自起动能力，可以不需要轴伸，便于采用氢冷却密封。

工作原理　同步电动机的定子三相对称绕组接到三相对称交流电源上时，就会产生三相合成基波旋转磁通势，简称电枢磁通势，用空间相量 $\underline{F}_a$ 表示。$\underline{F}_a$ 的转速为同步转速 n_1，设转向为逆时针方向。当励磁绕组通入直流励磁电流 I_f 时，产生基波励磁磁通势，用空间相量 $\underline{F}_f$ 表示。这样，作用在主磁路上的磁通势共有两个：一是电枢磁通势 $\underline{F}_a$，另一是励磁磁通势 $\underline{F}_f$。两者相对于转子是静止的，相对于定子是以同步转速 n_1 逆时针方向旋转，即同步旋转。$\underline{F}_a$ 和 $\underline{F}_f$ 的空间相位不一定相同。$\underline{F}_a$ 和 $\underline{F}_f$ 的合成磁通势为 $\underline{F}_R$，即

$$\underline{F}_R=\underline{F}_a+\underline{F}_f \tag{1}$$

如果把 $\underline{F}_R$ 看成等效磁极，把转子看成电磁铁，根据磁的异性相吸、同性相斥的基本物理特性，旋转的等效磁极 N 和 S 分别与电磁铁的 S 极和 N 极相吸，如图 3 所示，于是转子就以同步转速 n_1 逆时针方向旋转。在忽略定子绕组漏阻抗的情况下，转子磁极落后等效磁极 θ 空间电角度，θ 叫功率角。θ 角也是励磁磁通势 $\underline{F}_f$ 落后合成磁通势 $\underline{F}_R$ 的空间电角度。

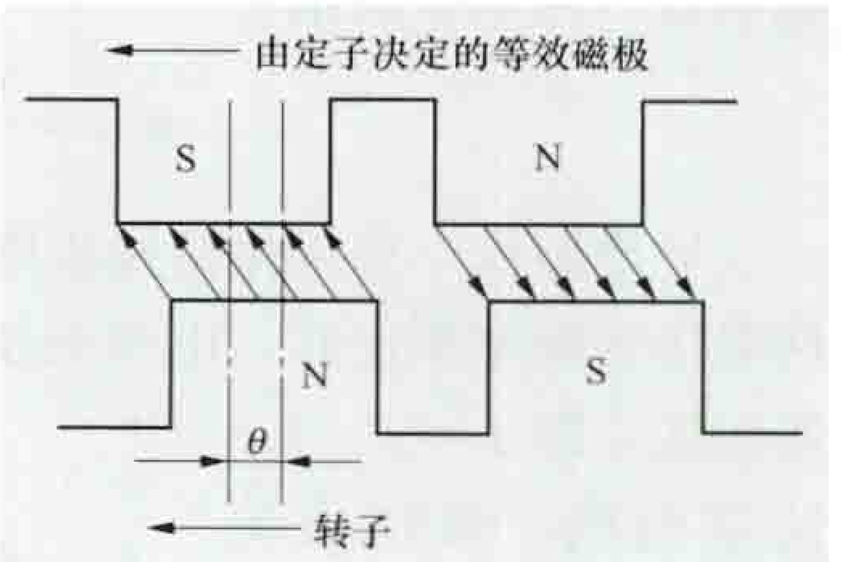


图 3　等效磁极与转子磁极的相对位置

性能指标　有功角特性和 V 形曲线。

功角特性　凸极同步电动机在忽略定子电阻时，电磁功率 P_M 和电磁转矩 T 与功率角 θ 的关系为

$$P_{M}=m\left[\frac{EU}{X_{d}}\sin\theta+\frac{U^{2}(X_{d}-X_{q})}{2X_{d}X_{q}}\sin2\theta\right] \quad (2)$$

$$T=\frac{P_{M}}{\Omega_{1}}=\frac{m}{\Omega_{1}}\left[\frac{EU}{X_{d}}\sin\theta+\frac{U^{2}(X_{d}-X_{q})}{2X_{d}X_{q}}\sin2\theta\right] \quad (3)$$

式中 m 为相数；E 为励磁电动势，由励磁磁通势产生的气隙磁密切割定子绕组产生的每相电动势有效值，V；U 为定子相电压，V；Ω_1 为同步机械角速度，$\Omega_1=\frac{2\pi n_1}{60}$，rad/s；$X_d$、$X_q$ 分别为直轴同步电抗、交轴同步电抗，Ω；θ 为功率角，忽略定子电阻时，也是 $\underline{E}$ 与 $\underline{U}$ 之间的时间电角度。

式（2）和式（3）中等号右边的第一项与励磁电动势 E 成正比，即与励磁电流的大小有关。式中的第二项，与励磁电流大小无关，它是由于凸极式转子上的直轴和交轴磁阻不等（即 $X_d \neq X_q$）而产生的，这项功率（转矩）叫磁阻（或反应）电磁功率（电磁转矩），利用磁阻电磁转矩可制成磁阻电动机，亦称反应式同步电动机。

对于隐极同步电动机，由于气隙均匀，参数 $X_d=X_q$，所以式（2）和式（3）中的第二项为零。

如果式（2）和式（3）中等号右边除 θ 外，其他各项都不变，则 P_M 和 T 的大小都与 θ 成函数关系。$P_M=f(\theta)$ 和 $T=f(\theta)$ 的关系分别叫同步电动机的功角特性和矩角特性，曲线如图 4 所示。图 4 中，曲线 1、2 分别为式（2）、式（3）中第一、二项与 θ 的关系，曲线 3 是合成总的电磁功率或电磁转矩与 θ 的关系。对于隐极同步电动机只有曲线 1。由图 4 可知，总的最大电磁功率 $P_{M,max}$ 和最大电磁转矩 T_{max} 对应的 θ_{max} 角，在凸极机中小于 90°，在隐极机中等于 90°。当负载增加时，等效磁极与电磁铁轴线间的空间电角度 θ 拉开增大，当 θ 达到 θ_{max} 以后，如负载再增大，会使两组磁极轴线进一步拉开，当 $\theta>\theta_{max}$ 时，P_M 和 T 不再增大，这时会出现 $T<T_L$（负载转矩）的现象，使电动机减速，以致 θ 更增大，减速愈甚，结果导致转子不能与定子等效旋转磁极同步运行，电动机处于失步状态，最后被迫停转。最大电磁转矩 T_{max} 决定了同步电动机的静态稳定极限，它与额定转矩 T_N 之比，叫过载倍数，用 K_M 表示

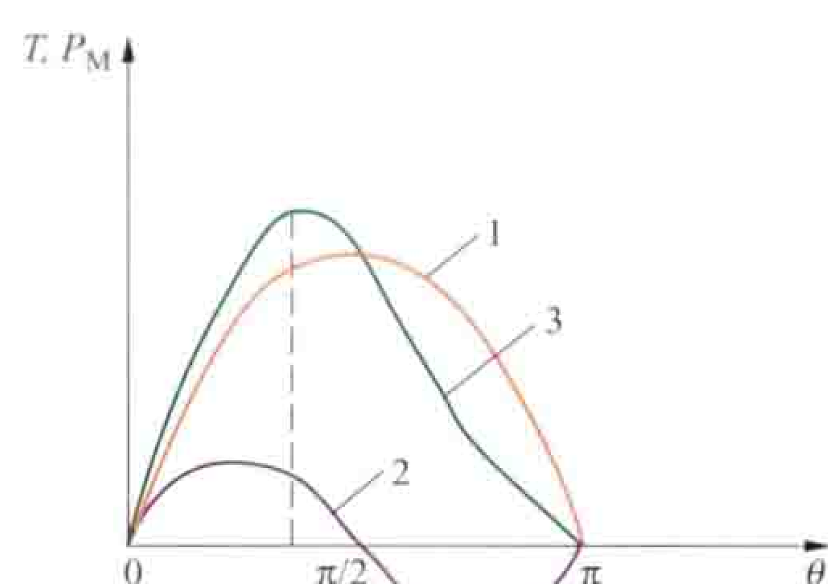


图 4　同步电动机的功角特性和矩角特性

$$K_M=\frac{T_{max}}{T_N}$$

V 形曲线　如果保持同步电动机的机械负载不变，当电网电压和频率恒定时，电枢电流 I 与励磁电流 I_f 之间的关系曲线，即 $I=f(I_f)$ 关系曲线，形状像英文字母“V”，故称 V 形曲线，如图 5 所示。对应一定电磁功率，有一条 V 形曲线，图 5 中各条 V 形曲线对应的电磁功率为 $P'''_M>P''_M>P'_M$。对每条 V 形曲线，电枢电流 I 有一最低点，这时定子仅从电网吸收有功功率，$\cos\varphi=1$，此点所对应的励磁电流称为正常励磁电流。把这些点连起来就称为 $\cos\varphi=1$ 的线。此线微向右倾斜，说明输出为纯有功功率时，输出功率增加的同时，必须相应地增加一些励磁电流。$\cos\varphi=1$ 线的左边是欠励区，励磁电流小于正常励磁电流，电动机自电网吸收滞后于端电压的电流，$\cos\varphi$ 是滞后性的；右边是过励区，励磁电流大于正常励磁电流，电动机自电网吸收超前电流，$\cos\varphi$ 是超前性的。过分减小励磁电流 I_f，电动机就会失去同步，进入图 5 中虚线所示的不稳定区。如增大励磁电流 I_f，使电动机处于过励状态，则可从电网吸取容性无功功率，起到改善电网功率因数的作用，这是同步电动机的突出优点之一。

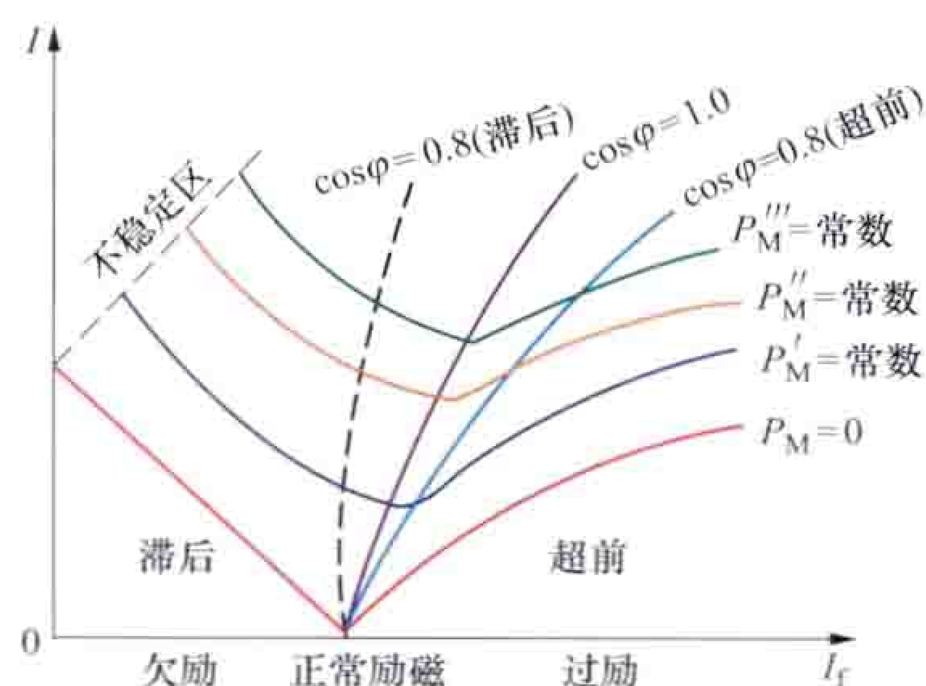


图 5　同步电动机的 V 形曲线

$P_M=0$ 的 V 形曲线可看作同步调相机的 V 形曲线。实际上 P_M 只接近于零，而不能为零，因为空载运行的电动机（即调相机）仍须从电网输入少量的有功功率以补偿其损耗。

起动　同步电动机仅在同步运行时才能产生恒定的电磁转矩，在其他转速时，电磁转矩正、负交变，平均转矩为零，所以同步电动机在恒频起动过程中，本身没有起动转矩，不能自起动。同步电动机的起动方法有辅助动力机起动、异步起动、准同步起动和变频起动。（见交流电动机起动）

tongbu ganying diandongji

同步感应电动机　(synchronous induction motor)

以感应电动机方式起动的同步电动机。其转子绕组与绕线转子感应电动机的转子绕组类似，可兼作起动和励磁之用。起动时将定子绕组接上电源，采用适当的起动方法（例如用转子外接起动电阻的方法），使其成为感应电动机而起动。此后，在转子绕组中通入直流励磁电流，产生同步电磁转矩将其牵入同步，作为同步电动机稳定运行。这种电动机兼有绕线转子感应电动机起动转矩大和同步电动机功率因数高的优点，适用于要求有大起动转矩的大容量机组，如水泥厂拖动球磨机的电动机、高炉送风机的大容量高速同步电动机的起动电动机等。同步感应电动机的缺点是起动时转子绕组中可能出现较高的电压，因此，转子绕组的匝数不能太多。

tongshilü

同时率　(diversification factor)

同类用电负荷在同一时间开机用电的概率。它用于描述同类用电负荷可能出现相互叠加用电的程度。根据用电对象的不同，常用的同时率有用电设备同时率（即同类型用电设备的同时率，如照明同时率）、最大负荷同时率等。其中最大负荷同时率是指在一段规定的时间内，电力系统综合用电最大负荷与其下所属各个地区（或各用户、各变电站）各组成单位各自用电最大负荷之和的比值，用以预计电力系统用电最大负荷。其计算公式为

$$K_0=\left(P_{max}\Big/\sum_{i=1}^{n}P_{i,max}\right)\times100\%$$

式中 K_0 为同时率，%；P_{max} 为综合用电最大负荷，kW；$\sum_{i=1}^{n}P_{i,max}$ 为各组成单位的最大负荷之和，kW。

由于系统各单位用电特性的差异，出现最大负荷的时间也不一致，因此，电力系统出现的综合用电最大负荷远小于

电力系统各组成单位不同时间出现的最大负荷之和，最大负荷同时率一般小于1。

tongdianjie

铜电解 (copper electrolysis) 以硫酸铜水溶液为电解液，进行电解提取或精炼铜的冶金过程。最早将电解应用于工业的是英国人J. B. 埃尔金顿(J. B. Elkington)，1836年，他使镀银工业化。在此基础上，1865年确立了铜的电解精炼法。此方法一直沿用至今。20世纪60年代末，试验成功了周期反向电流电解法。1979年，澳大利亚汤斯维尔精炼厂开发出永久性阴极电解法，以不锈钢板代替已沿用百余年的铜始极片阴极，寿命可达15年。图为电解铜生产线。

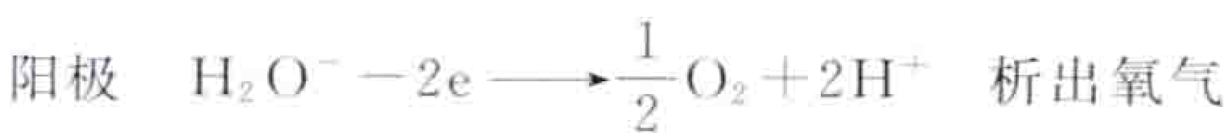


电解铜生产线

以电解方法从铜的浸出液中提取铜，称为铜的电解提取，又称电积。以电解方法提纯火法精炼产出的阳极铜，称为铜的电解精炼。铜的电解提取主要用于从贫矿石和废矿堆浸溶液中电积铜。火法精炼的铜，可达到很高的纯度，若不含贵金属，即可作为商品出售。多数火法精炼铜中含有贵金属，所以需经电解精炼，以便在提纯的同时，将其中金、银等贵金属富集于阳极泥中以进一步提取。

铜的电解提取 用溶剂将铜矿石中的铜溶解、净化提纯后的硫酸铜溶液作为电解液，以铅基合金为阳极，以不锈钢为阴极进行的电解，属不溶阳极电解。铜电解提取时，在阴、阳极上进行如下电化学反应


阴极 $Cu^{2+}+2e \longrightarrow Cu$ 析出金属铜


阳极 $H_2O^{-}-2e \longrightarrow \frac{1}{2}O_2+2H^{+}$ 析出氧气

电解过程中的电解槽槽电压为1.8～2.5V，电流密度为180～280A/m²。由于槽电压高，电流效率为85%～95%，故直流电耗较高，为1700～2250kW·h/t。电解铜纯度可达99.95%～99.9935%。

铜的电解精炼 火法精炼产出的铜，含铜99.0%～99.7%，还含有金、银等贵金属和少量杂质，通常须进行电解精炼。铜的电解精炼属可溶阳极电解，分为电解和电解液净化两个工序。电解是提纯过程，电解液净化是除去电解液中过量的铜离子、生产硫酸盐、回收酸、除去过量杂质的过程。

铜的电解 传统的铜电解精炼是将火法精炼产出的铜铸成阳极，以电解产出的铜始极片为阴极，以硫酸铜和硫酸的水溶液为电解液，在电解槽中通直流电进行电解。在阴、阳极上有如下的电化学反应


阴极 $Cu^{2+}+2e \longrightarrow Cu$ 析出金属铜


阳极 $Cu-2e \longrightarrow Cu^{2+}$


$Me'-2e \longrightarrow Me^{2+}$

Me′表示Fe、Ni、Pb、As、Sb等负电性金属杂质。在电解过程中，电解槽的槽电压为0.2～0.25V，电流密度为220～270A/m²，电流效率为95%～98%，电解铜消耗直流电能230～260kW·h/t，电解铜纯度可达99.95%～99.9935%。

在电解过程中，电解液必须循环，同时还要加热，维持其温度在55～60℃，以加速Cu^{2+}的扩散，消除浓差极化(见电极极化)。此外，还要在电解液中加入少量添加剂，以得到致密、平滑的阴极铜。

残留在阳极表面和沉积在电解槽底部的不溶泥状物称为阳极泥，是回收金、银、铂等贵金属的重要原料。

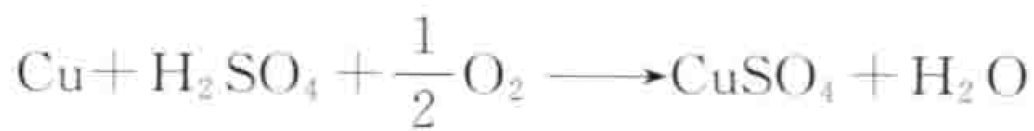
铜电解槽壳体采用钢筋混凝土结构，内衬防腐蚀衬里。还有由呋喃树脂、呋喃树脂混凝土粉、石英砂、石英石等制作的拼装式呋喃树脂混凝土电解槽。有些厂家采用了无衬里的预制聚合物混凝土电解槽，耐腐蚀性好，电解槽的安装、操作和维修也大大简化。

铜的电解精炼还有周期反向电流电解法和永久性阴极电解法。周期反向电流电解法是将通过电解槽的直流电周期性短时间地改变电流极性，以便在提高电流密度的情况下降低电极极化(阳极钝化和阴极质量下降)的影响。实际应用的电流密度为400A/m²，这样可不增加设备而提高产量，或减少电解槽的数量、缩小厂房。但由于供电设备和导电排费用的增加而部分抵消了上述优点。永久性阴极电解法是以不锈钢板作为阴极代替铜始极片，析出的铜达一定厚度时定期从不锈钢阴极板上剥离。阴极经处理后可重复使用。由于永久性阴极板规整平直，电流密度可提高至280～330A/m²，极间距离可缩短10mm，电流效率和作业率均较高。

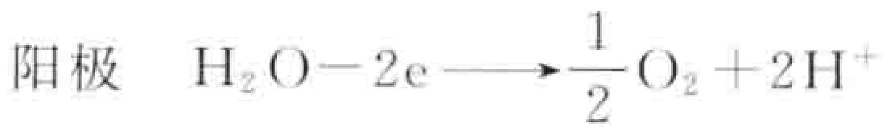
铜电解液净化 在电解过程中，大部分Ni、Fe、Zn和一部分As、Sb进入溶液，使电解液中的杂质不断增加，硫酸浓度不断降低。为维持电解的正常进行，必须定期从系统中抽出部分电解液进行净化，并补充一定量的硫酸。

铜电解液净化过程一般可分为浓缩结晶析出硫酸铜，电解脱铜除As、Sb，回收粗硫酸镍。

(1)浓缩结晶析出硫酸铜(胆矾)：抽出的电解液先经蒸发浓缩，使溶液含铜过饱和，然后结晶析出硫酸铜。也可用在溶液中加铜屑、铜线等物料，鼓风使铜氧化溶解，以产生更多的胆矾。其反应如下


$$Cu+H_2SO_4+\frac{1}{2}O_2 \longrightarrow CuSO_4+H_2O$$

(2)电解脱铜除As、Sb：以结晶析出胆矾后的母液为电解液进行电积，进一步脱铜并除去As、Sb等杂质。脱铜电解常逸出有毒气体，须在单独的房间内进行，并加强通风。脱铜电解的阴、阳极反应如下


阳极 $H_2O-2e \longrightarrow \frac{1}{2}O_2+2H^{+}$


阴极 $Cu^{2+}+2e \longrightarrow Cu$


$As^{3+}+3e \longrightarrow As$

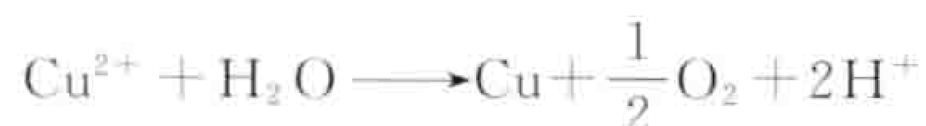

$Bi^{3+}+3e \longrightarrow Bi$


$Sb^{3+}+3e \longrightarrow Sb$



$$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2$$

总反应为



$$Cu^{2+} + H_2O \longrightarrow Cu + \frac{1}{2}O_2 + 2H^+$$

或



$$CuSO_4 + H_2O \longrightarrow Cu + \frac{1}{2}O_2 + H_2SO_4$$

通常先产出合格的电铜，随着溶液中铜离子浓度的降低，As、Sb大量析出，产生含As很高的黑铜粉。

(3) 回收粗硫酸镍：电积脱铜后的溶液含有镍及硫酸，可用蒸发浓缩或冷却结晶的办法产出粗硫酸镍，母液则作为部分补充硫酸返回电解液中。

参考书目

彭容秋．铜冶金．长沙：中南大学出版社，2004.

tongtiesun dianliang

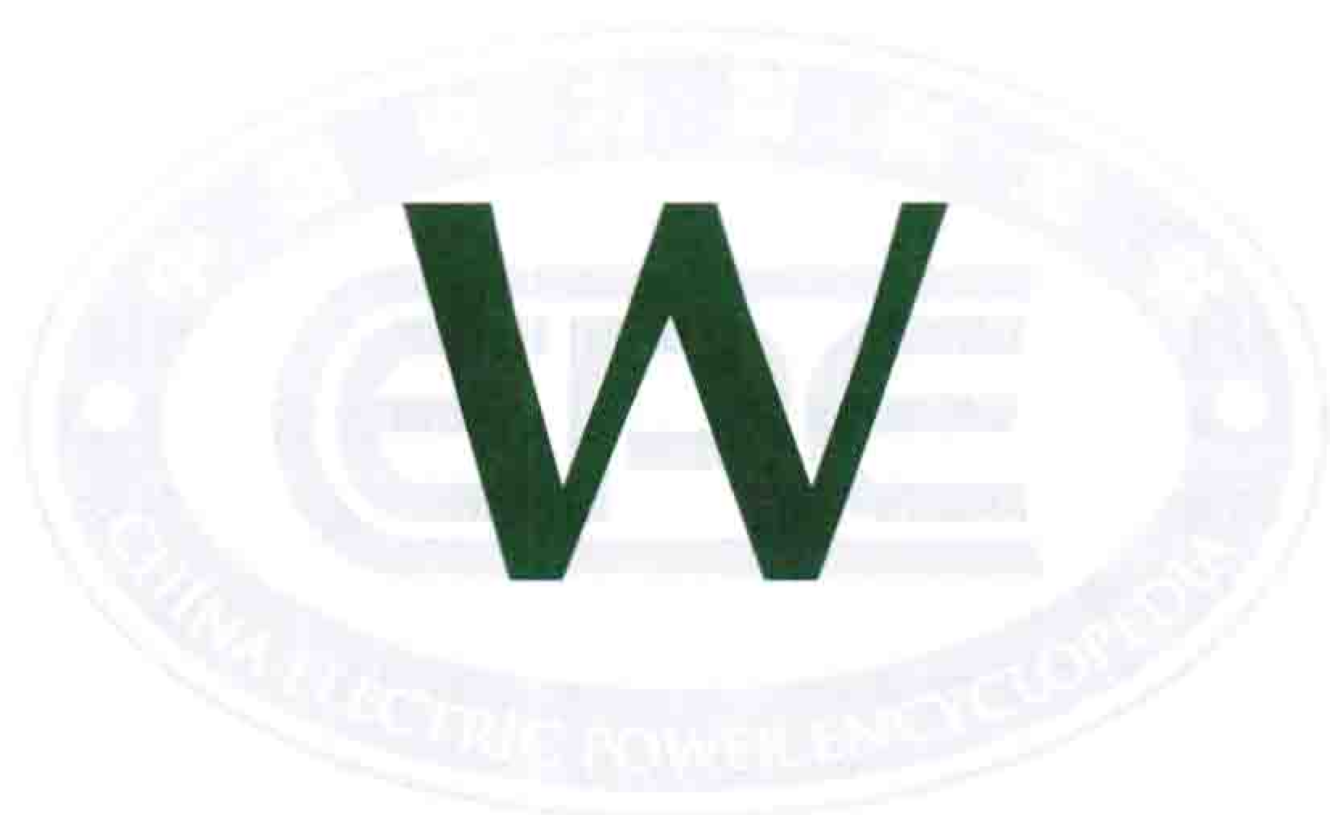
铜铁损电量 (copper-iron loss electricity) 运行变压器的电能损耗电量。它由可变损耗电量和固定损耗电量组成，也称变压器的负载损耗电量和空载损耗电量。当用户端的电能计量方式为高供高计时，变压器的铜铁损电量已计入电能计量装置；电能计量方式为高供低计时，变压器的铜铁损电量则未计入电能计量装置，因此在计算用户用电量时，需要加上变压器的电能损耗电量。

铜铁损电量是由变压器本身固有的特性决定的。铜损电量是变压器绕组损耗的电量，为可变损耗，它与用电负荷的大小有关，随用电负荷和用电功率因数的高低而变化，与电流 I 的二次方成正比；铁损电量是变压器铁芯损耗的电量，为固定损耗，它与运行时间有关，不随负载变化而变化，与电压 U 的二次方成正比。铜损电量一般通过变压器短路试验测得其满载时的铜损电量，再按其运行时间和负载特性折算得到；铁损电量一般通过变压器空载试验测得。铜铁损电量一般以有功损耗电量和无功损耗电量来表示，计算公式

有功损耗电量　$W_P = (P_0 + K_T\beta^2 P_K)\,T$

无功损耗电量　$W_Q = (Q_0 + K_T\beta^2 Q_K)\,T$

式中 P_0 为空载有功损耗，kW；Q_0 为空载无功损耗，kvar；K_T 为负载波动损耗系数，β 为平均负载系数；P_K 为额定负载损耗，kW；Q_K 为额定负载漏磁功率，kvar；T 为变压器运行时间，h。



wannengshi duanluqi

万能式断路器 （universal circuit breaker） 所有的零件都安装在一个绝缘的或金属的框架上，能接通、承载以及分断正常电路条件和非正常电路条件下电流的一种机械开关电器，又称框架式断路器。主要用于低压配电电路，分配电能和保护线路及电源设备的过载、欠电压、短路等，在正常条件下，可用于线路的不频繁转换。

万能式断路器采用立体布置形式，具有结构紧凑、体积小的特点，其外形见图。有固定式和抽屉式之分，将固定式断路器本体装入专用的抽屉就成为抽屉式断路器，抽屉座由带有导轨的左右侧板、底座和横梁等组成。



万能式断路器

万能式断路器由绝缘系统，触头系统，灭弧室，操动机构和手动、电动储能机构，智能控制器等部件组成。

(1) 绝缘系统。断路器底座及盖采用绝缘性、阻燃性、机械强度都很好的绝缘材料，用于提高断路器的分断能力，保证断路器的机械、电气寿命。

(2) 触头系统。采用主、弧触头系统，多路并联，降低电动斥力、提高触头系统的电动稳定性；采用新型耐弧触头材料，使触头在分断短路电流后不致过分发热。

(3) 灭弧室。置于断路器的绝缘基座内，每极分开，相互绝缘，与其他部分及操作人员隔离，既安全又不致在分断大电流时炸裂。采用去离子栅片灭弧原理，使得万能式断路器上方飞弧距离为零。

(4) 操动机构和手动、电动储能机构。采用五连杆机构，完成合、分闸动作，并可手动或电动储能。储能机构是利用一系列复杂的机械机构，拉伸一根大直径弹簧储能，利用脱扣机构，将主弹簧由拉伸位置解锁释放，进而执行合闸或者分闸操作。

(5) 智能控制器。用于实现万能式断路器的过载长延时、短路短延时、短路瞬时保护功能，并增加了扩展功能。（见智能化低压电器）

wangshang gongdian yingyeting

网上供电营业厅 （online power supply business service）

供电企业为用户提供网络服务的平台，又称互动供电服务网站。它是供电服务的重要渠道之一。

网上供电营业厅的功能：①公共服务。服务对象为所有客户，提供咨询查询、投诉举报、信息公告、在线缴费、电费充值、客户留言、服务评价、政策阅览、在线对话等基本服务功能。②专业服务。服务对象为网站注册用户、网站认证用户等，除提供公共服务功能外，还提供如会员注册、查询、单据下载、打印、信息告示（工程信息、电器产品信息等）、短信订阅等专业服务功能。

weibo jiare

微波加热 （microwave heating） 利用频率为300MHz～300GHz的超高频电磁波（即微波）的能量对非导电（电介质）和部分导电类材料进行的*电加热*。它与*介质加热*同属高频电场加热，加热原理和优缺点也类同，但工作频率要高得多，因此被加热材料单位体积所吸收的功率也更大，加热更迅速，热效率更高，使用更方便，特别在烹调食品时可不失新鲜和营养，应用也更灵活和广泛。为避免对电视、微波通信和雷达等产生干扰。国际上规定的微波加热专用频率是915，2450，5800，22125MHz，常用的是2450MHz。

应用 微波加热的应用领域基本上与介质加热的相同，但应用灵活性更大，还可用于卷烟、茶叶和中草药的烘烤，蔬菜的脱水，食品烹调，化工产品、药品、化学试剂等的干燥，理疗等。

装置构成 用来产生微波能并将其传送给物料进行加热及相应热加工的，由电气和机械设备所组成的成套装置，通常包括微波发生器、波导管或同轴电缆、微波加热器、传送物料和通风的设备等。

微波发生器用来产生所需工作频率的电磁波，微波输出功率可达上百千瓦，其中小于300W者用于理疗，400～1000W者用于家用*微波炉*和实验设备，1000W以上者用于工业，其热效率为70%～80%。产生微波能的器件主要有连续波磁控管和多腔速调管。常用的915MHz连续波磁控管可获得60kW功率输出，2450MHz连续波磁控管可获得5kW功率输出，速调管可获得30kW功率输出。这些管子需由变压器和整流器为其提供交流灯丝电压和阳极直流高压。微波发生器产生的微波能由波导管或同轴电缆传送到微波加热器。

微波加热器又称微波施加器，是把微波能施加于物料的结构部件。按被加热物料的种类和微波场作用形式，微波加热器可分为驻波场谐振腔加热器、行波场波导加热器和辐射加热器等几类。间歇式驻波场谐振腔加热器又称微波箱，其结构简图如图1所示，放置物料的谐振腔空间由金属内壁、门和进出口所包围并谐振

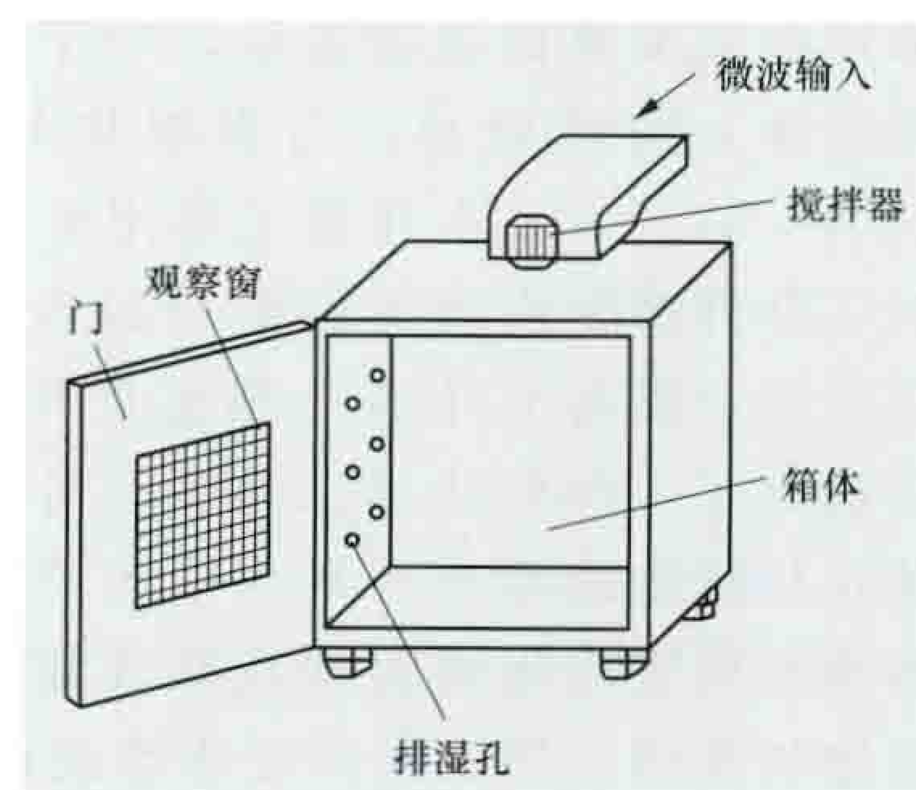


图1 微波箱结构简图

于微波频率范围。这里要特别指出的是，微波遇到金属良导体时，会被反射；遇到玻璃、塑料、陶瓷等会顺利通过，不会被吸收而发热。因此，常用金属隔离微波，制作箱体和波导；用金属网外加钢化玻璃制作炉门观察窗；用玻璃、塑料和陶瓷制作转盘和盛放物料的器具。行波场波导加热器一般用于连续式微波加热装置，微波在加热器内无反射地由一端向另一端传输，构成行波场，终端一般用水负载吸收剩余的能量。图2所示为一种开槽波导加热器示意图（又称蛇形波导加热器），电场强度在槽隙处很集中，适用于丝材和带材等的加热。辐射加热器用于把微波能直接辐射到被加热物体上进行加热，多用于理疗，有多种结构形式。图3所示为一种用于理疗的圆形辐射加热器。

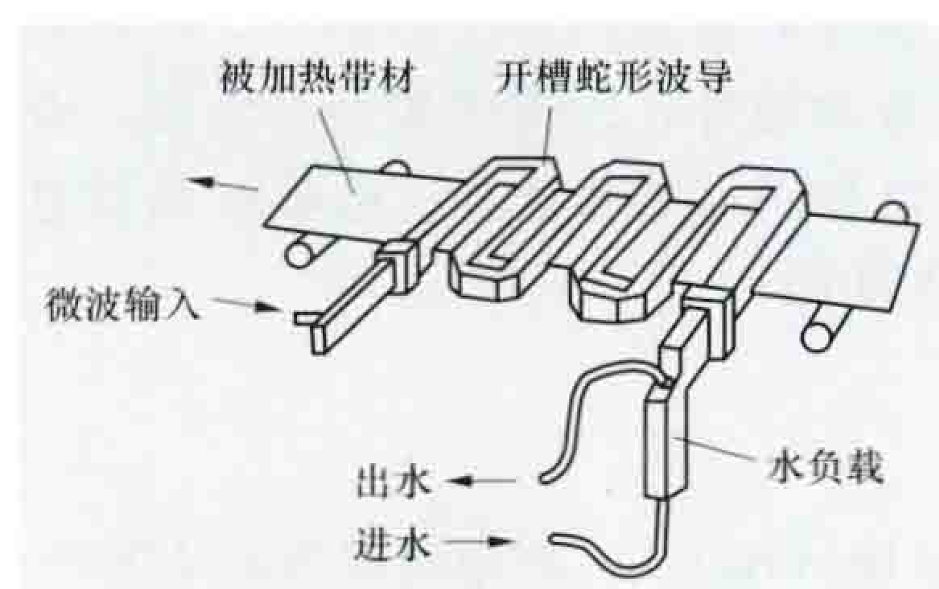
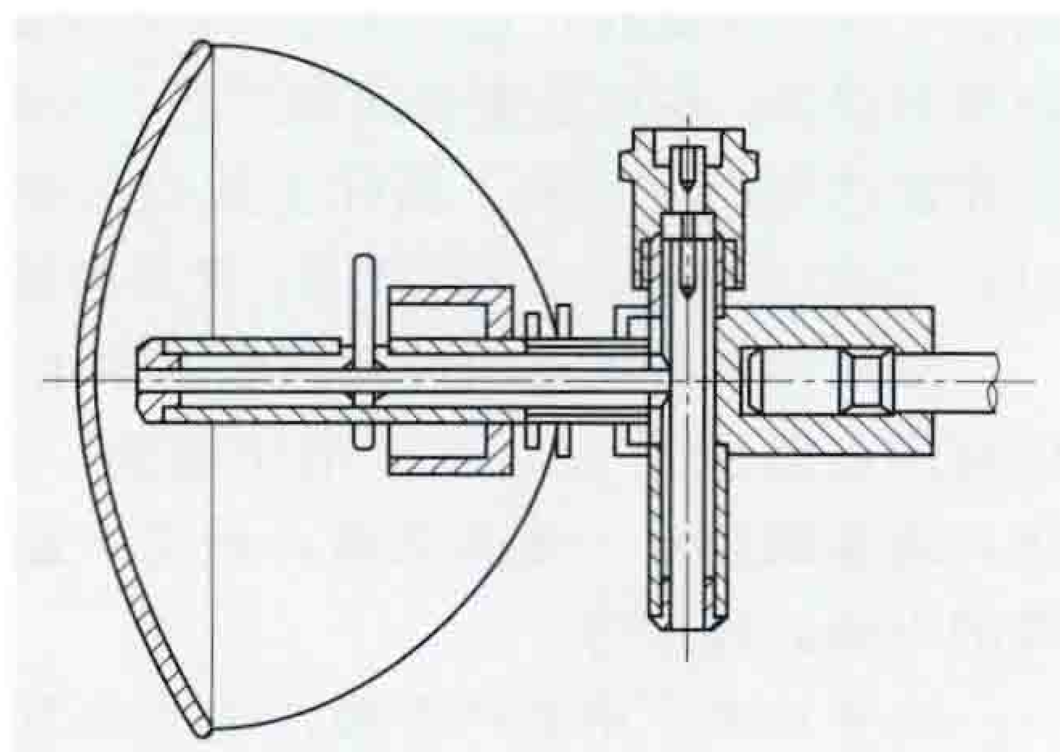


图2 开槽波导加热器示意图

传送设备用于连续式微波加热装置中物料的输送，通风设备用来排放加热过程中产生的烟气。


图3 理疗用圆形辐射加热器

微波加热装置的设计、制造和使用应遵循有关安全标准的规定，应有效防止微波泄漏所产生的辐射危险，以免对操作人员造成伤害和对电视、通信和雷达产生干扰。

历史与发展 微波加热始于20世纪60年代，最早用于宇航员食物的烹调，后在家用微波炉上取得发展。60年代后半期开始进入工业应用领域，主要用于食品的膨化发泡、灭菌，果汁真空浓缩，橡胶连续硫化，木材的软化弯曲加工，陶瓷制品的干燥、烧成，尼龙等化学纤维制品的染色，医药品的干燥灭菌，癌症的治疗等国计民生的各个领域。90年代，微波加热的应用范围进一步拓宽，在垃圾干燥焚烧灰化处理、垃圾焚烧灰熔融处理、废旧沥青的再生利用以及医院医疗废弃物与下水道污泥的灭菌处理等废物利用与环境保护方面取得了重大成功。进入21世纪，微波加热技术的应用仍在不断发展。美国开发了采用微波加热的流态床炉，用于金属零件（如铝质发动机机体）的热处理，与常规热处理工艺相比，可节能28%～54%。日本开发了采用电阻加热和微波加热分别对工件外部和内部实施混合加热的技术，可有效缩短加热时间，提高工件的加热温度均匀性，节能效果显著，还提高了工件的热加工品质。另外，国外还采用微波加热在柑橘皮的循环再利用中生产天然香料和塑料，采用特殊的陶瓷坩埚通过间接微波加热来熔炼某些金属，如将铀的车屑、锯末和碎块熔炼成块料等。中国从20世纪70年代开始微波加热的工业应用，主要在白酒酿造、中草药干燥杀菌、花粉破壁、抗菌剂干燥、木材加工、橡胶硫化、卷烟烘烤、茶叶烘烤、微波针灸、理疗、肿瘤和痔疮治疗等方面做了大量开拓性工作。

weibo liudeng

微波硫灯 (microwave sulfur lamp) 利用微波能量激发石英玻壳内的硫和氩气而发光的电光源。微波硫灯由微波源和充有硫和氩气的石英泡壳组成。磁控管为发生频率为2450MHz微波能量的微波源。石英泡壳内的硫元素为传导媒介的等离子体充填物，充入压力为266～532Pa的低压氩气。氩气的作用是帮助硫灯启动。当微波能量耦合到高速旋转的石英泡壳内，泡壳内的氩气首先激发放电，正柱区呈现淡紫红色，紧接着，在氩气放电中硫被加热蒸发，形成10^6Pa高压的微波硫蒸气放电，根据分子发光的辐射机理，可先观察到从固态硅表面外腾起白色光团，随后会产生似阳光一般的强烈白光辐射，前后过程约30s。

微波硫灯（见图）发光效率大于100lm/W，寿命超过50 000h，色温为5500～6500K，显色指数大于80，并具有无汞害污染、良好的光维持率（燃点10 000h后光衰小于3%）、短时启动及低紫外和红外输出等特点，再加上还可与导光管配合使用，因此能广泛地应用于大范围室内外照明场合，如飞机场、地铁车站、运动场、会议厅、飞机库、大型维修车间、公路、街道、工业企业等。另外，由于它的光谱能量分布接近太阳光，因此在植物生长实验室、封闭的人工照明植物生长研究室以及臭氧层耗损分析、暖房气体效应、挥发性碳氢化合物的污染、酸雨现象和环境变化等方面的研究和工作中均可作理想的光源。


微波硫灯

微波硫灯以其高光效和高光强，备受世人瞩目，被公认为绿色照明工程中一种极其重要的节能光源，可以预见，这一光源的成功推广，将会给21世纪照明事业带来前所未有的新面貌。

weibolu

微波炉 (microwave oven) 一种利用微波的热效应进行食物加热和烹饪的电烹饪家用电器。规定民用微波加热频率为2450MHz。（见微波加热）

分类 按照功能的不同，微波炉有单一式和复合式之分。按照控制方式的不同，微波炉有机械控制式和电子控制式之分。

结构与原理 微波炉主要由波导、搅拌器、加热室（炉腔）、炉门、磁控管、整流器、变压器、电容器等组成，见图1。其外形见图2。

微波炉的电路如图3所示。电源通入变压器一次绕组后，一方面通过灯丝绕组供给磁控管灯丝电流，另一方面由

高压绕组输出高压送至倍压整流电路，变成直流负高压加到磁控管的阴极，磁控管产生振荡并发射出微波，经过波导传输到加热室。随着搅拌器的低速转动，在加热室中辐射出均匀分布的微波。加热室由金属材料制成，微波在加热室里可来回反射，并被食物反复吸收，完成烹饪过程。炉门与加热室接缝要求高度密封，确保微波泄漏在允许范围内。炉门开启时通过联锁开关触点断开微波炉的电源，微波停止辐射，防止开门时对人体的伤害。

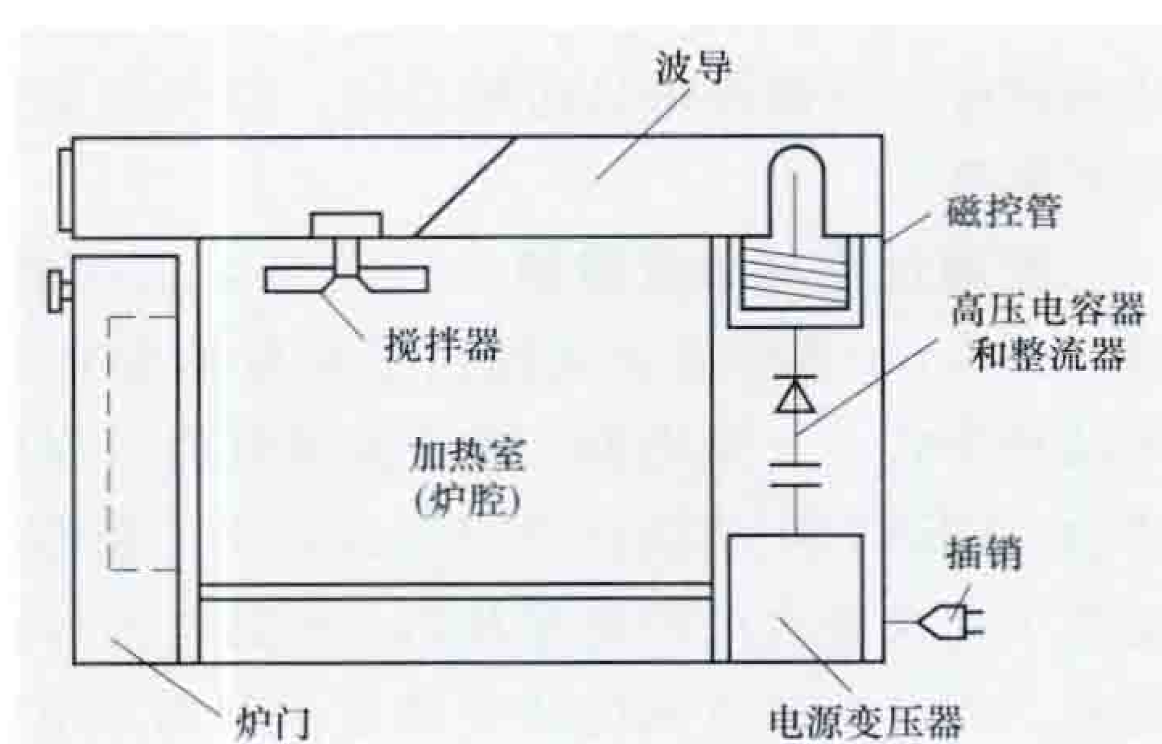


图 1 微波炉结构示意图



图 2 光波变频微波炉

注意事项 微波具有热效应、直线传播以及对不同物质表现出透射或反射等物理特性。微波对大部分非金属材料具有透射性，表现为微波对这些物质没有热效应。微波对金属具有反射性，即微波遇到金属，既没有热效应也不会穿透，而是按照反射原理被反射。因此，玻璃、陶瓷以及某些耐高温塑料适于做成微波炉专用器皿，而不宜使用金属容器。

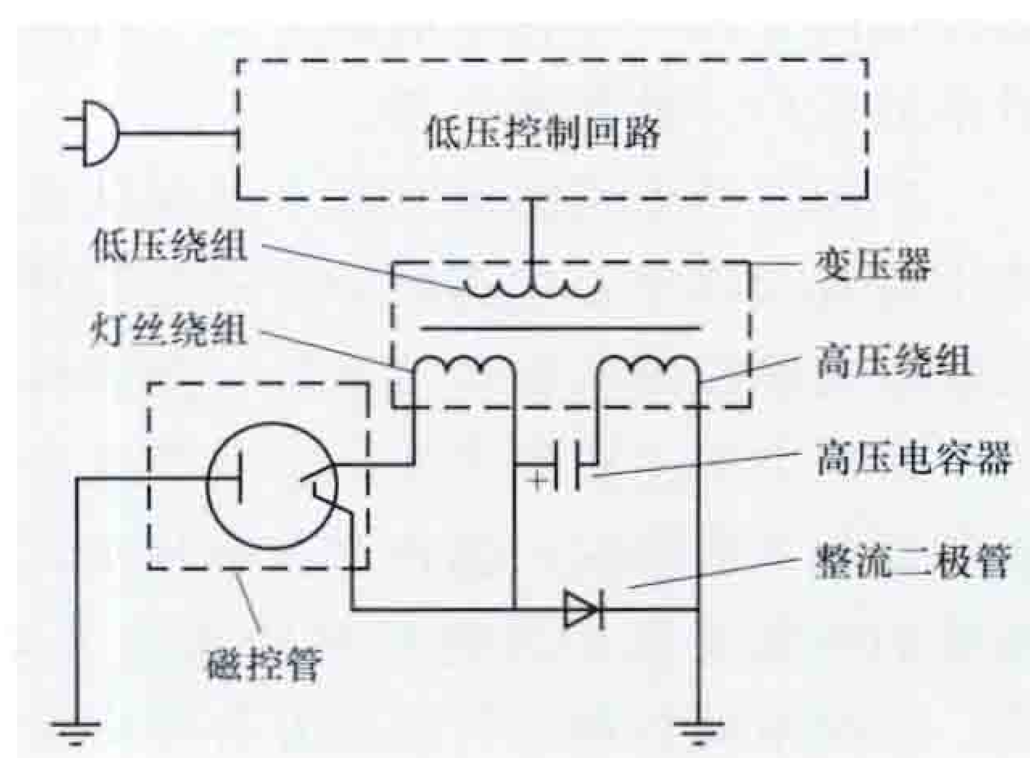


图 3 微波炉电路

传统炉具对食物的加热过程是逐步以传导方式由表及里地将热传递到食物内部，而微波炉是利用微波的穿透性和热效应在食物内外同时加热，因此不适合加热带有坚硬壳体的食物。这是因为食物内部受热后会产生蒸汽，如果被有坚硬的壳体或容器封闭，蒸汽就不能及时释放出来，就会聚集并形成一定压力，当压力达到一定程度时，就可能冲突壳体或容器，造成爆炸。如鸡蛋、栗子等都不能直接放在微波炉里加热。食物装在容器里用微波炉加热时，也不宜将容器封闭。

微波辐射对人体有害。虽然微波炉的防护技术和制造技术都很成熟，但微波炉在工作时，还是会有少量微波从门缝等处泄漏出来。因此在使用微波炉时，使用者在完成必要的操作后，应尽量离开微波炉一段距离，如 50cm 以上即可。

weidianwang

微电网 (micro grid) 由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷及其相应监控、保护装置组成的小型发配电系统，也称微网。微电网是一个能够实现自我控制、保护和管理的系统，既可以与配电网并网运行（并网型），也能以孤立电网形式独立运行（独立型）。并网型微电网通过一个公共连接点（point of common connection，PCC）与配电网连接，正常情况下，微电网与配电网并联运行，可减少馈线损耗，对当地电压起支撑作用；当配电网发生故障时，微电网与配电网解列而成孤岛运行，保证重要用户的电力供应。

按照微电网内主网络供电方式的不同，可分为直流型微电网、交流型微电网和混合型微电网。在直流型微电网中，充分利用大量分布式电源和储能系统可直接提供直流电这一特点，形成直流主网架，直接为直流负荷供电；对于交流负荷，则利用电力电子换流装置，将直流电转换为交流电供电。在交流型微电网中，将所有分布式电源和储能系统的输出首先转换为交流电，形成交流主干网络为交流负荷供电；对于直流负荷，需通过电力电子换流装置将交流电转换为直流电后为负荷供电。在混合型微电网中，无论是直流负荷还是交流负荷，都可以不通过交直流间的功率变换直接由微电网供电。

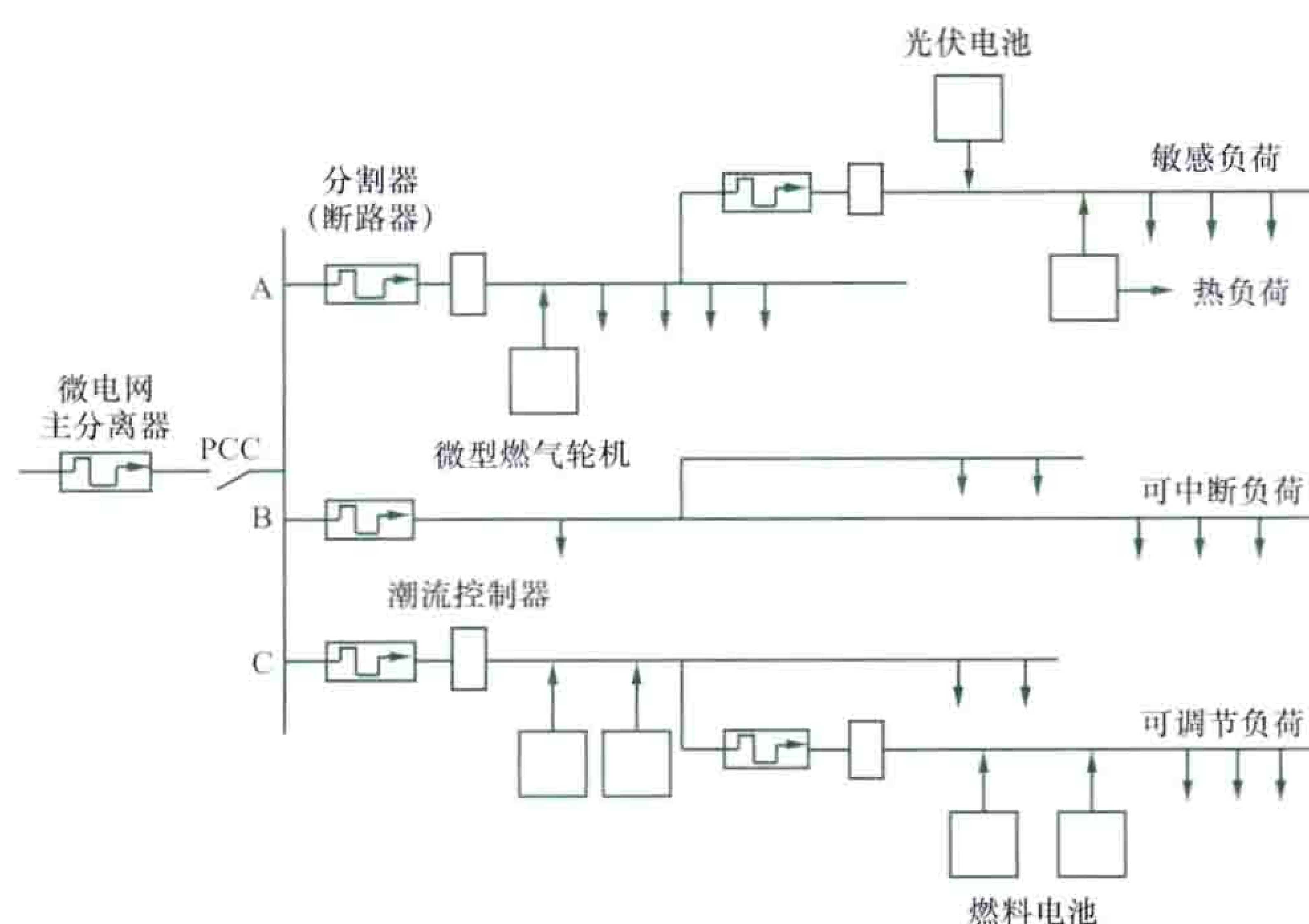
功能与作用 ①促进分布式电源并网。微电网可以充分发挥分布式发电的优势，消除分布式发电对电网的冲击等负面影响，将地域相近的分布式电源、储能装置与负荷结合起来进行协调控制，既可以与配电网进行能量交换，又可在配电网发生故障时独立运行。②提高供电质量。微电网在配电网停电时可脱网独立运行，为重要用户供电，提高供电可靠性；同时，可以根据终端用户的需求将负荷分级，为不同的负荷提供差异化的供电质量。③减少或延缓电网投资。微电网可以和现有电力系统结合形成一个高效灵活的新系统，在配电侧接入分布式电源，可减少或延缓配电网甚至输变电项目的建设。④降低网损。传统的供电方式是将大型发电厂发出的电能，经电力系统远距离、多级变送至用户。而微电网实现“就地消费”，有效减少了远距离的电能传输，从而降低了网损。⑤解决边远地区供电。偏远农村、海岛和荒漠地区地形条件复杂、地方经济发展相对滞后，远距离输电成本高、可靠性差，可以通过建立基于光伏电站、风力发电、小水电等电源的微电网，解决偏远地区的居民用电问题。

基本构成 包括集控中心、分布式电源、储能设备和具有自愈（故障重构）能力的配电网等。集控中心实现对微电网的控制、协调和管理等功能，实现微电网内部电能和负荷的一体化运行；分布式电源通常包括天然气、太阳能、生物质、氢能、风能、小水电等洁净能源或可再生能源发电类型；储能设备一般应用蓄电池、超级电容器和飞轮储能等。多数分布式电源与电网的接口是基于电力电子技术，以保证微电网的灵活性和可靠性。美国电力可靠性技术解决方案协会（CERTS）提出的微电网基本结构见下图。

关键技术 包括控制技术、保护技术、孤岛运行技术以及能量管理系统等。

控制技术 微电网控制功能基本要求包括：分布式电源接入时不改变原有的配电结构，微电网解、并列时是快速无缝的，无功功率、有功功率要能独立进行控制，电压暂降和电压不平衡可以缓解与校正，能适应微电网中负荷的动态需求。其主要控制功能有：①基本的有功和无功功率控制（*P-Q*

控制）。②基于调差的电压调节。微电网中只要电压整定值有小的误差，就可能产生大的无功环流，使分布式电源的电压值超标，因此，要根据分布式电源所发电流是容性还是感性来决定电压的整定值。③快速负荷跟踪和储能。由于微电网中发电机的惯量较小，有些电源（如燃料电池）的响应时间常数又很长（10～200s），因此，当与配电网解列成孤岛运行时，必须提供蓄电池、超级电容器、飞轮等储能设备，相当于增加一些系统的惯性，才能维持微电网的正常运行。④频率调差控制。在微电网孤岛运行时，要采取频率调差控制，改变各台机组承担负荷比例，以使各自出力在调节中按一定的比例且都不超标。



微电网基本结构

保护技术　微电网结构对继电保护提出了一些特殊的要求，主要有：①配电网一般是辐射形的，由于有了分布式电源，保护装置上流经的电流就由单向变为双向。②一旦微电网孤岛运行，其短路容量会有大的变化（短路电流变小），影响了原有的某些继电保护装置的正常动作。③改变了原有的单个分布式电源接入电网的方式。微电网可以维持对一些重要负荷在配电网故障时的正常供电，必须采用一些快速动作的开关，以代替传统的相对动作较慢的开关。这些均可能使原有的保护装置和策略发生变化。

孤岛运行技术　当微电网孤岛运行时，为了使所隔离的故障区尽可能小，微电网中保护装置的协调尤为重要。由于微电网的电源大多为电力电子型设备，所发出的电力通过逆变器与网络连接，故障时仅提供很小的短路电流（如2倍于正常负荷电流），难以起动常规的过电流保护装置。因此，保护装置和策略就应相应地修改，如采用阻抗型、零序电流型、差分型或电压型继电保护装置。此外，微电网的接地方式必须充分论证，避免微电网解列时继电保护误动作。

能量管理系统　微电网被定义为发电和负荷的集合，而通常负荷不仅包括了电负荷，还包括热和冷负荷，即热电联供和热电冷三联供。因此，微电网不仅要发电，而且要利用发电的余热以提高总体效率。实施能量管理系统（energy management system，EMS）的目的即为做出决策以最优地利用发电产生的电和热（冷）。该决策的依据为当地设备对热量的需求、气候情况、电价、燃料成本等。EMS的调度控制功能是为整个微电网服务的，潮流调度时需考虑燃料成本、发电成本、电价、气候条件等。EMS控制微电网内某些关键母线的电压幅值，并由多个分布式电源的控制器配合完成，与配电网相连的母线电压应由所连上级配电网的调度系统来控制。EMS还具有其他一些功能，如当微电网与配电网解列后微电网应具备快速切负荷的功能，以使微电网内的发电与负荷平衡等。

发展过程与研究展望　2001年，美国威斯康星大学R. H. Lasseter等学者正式提出了更好地发挥分布式发电潜能的结构形式——微电网，随后美国电力可靠性技术解决方案协会（CERTS）出版白皮书正式定义了微电网的概念。美国发生了几次较大的停电事故后，使其电力行业十分关注供电质量，因此对微电网的研究着重于利用微电网提高电能质量和供电可靠性。日本国土资源匮乏，对可再生能源的重视程度高于其他国家，但由于可再生能源发电的出力具有随机性，所以日本在微电网方面的研究更强调控制与储能技术。欧洲互联电网中的电源基本是靠近负荷的，比较容易形成多个微电网，所以欧洲微电网的研究更关注多个微电网的互联和市场交易问题。美国、欧洲、日本等国家和地区都已开展了微电网研究开发及示范工程建设工作。CERTS AEP微网是美国早期的典型微网示范工程，由美国电力公司（AEP）、TECOGEN公司、美国北方电力系统、S&C电气公司、桑迪亚国家实验室和威斯康星大学联合实施。欧盟相继在德国的曼海姆建立了欧盟微网示范工程——MVV；在荷兰的Zutphen度假村，建立了荷兰首个微网项目；丹麦的Bornholm岛为欧盟微网示范平台唯一中高压微网。日本新能源工业技术发展组织（NEDO）在“利用可再生能源的地区性电网工程”项目中启动了3个微网示范工程，分别设在日本的八户、爱知和京都。

中国对微电网的研究基本处在试点阶段，正在开展的示范工程有天津中心生态城分布式电源及微网系统、云南电力实验研究院微网实验示范系统、金风科技智能微网示范项目等。研究方向主要集中在：①分布式发电及其并网技术的完善和新技术的研发；②针对含有分布式电源及微电网的电力系统的控制及保护问题开展的适应多端电源的继电保护研究；③微电网各种运行状况及各种网络结构下对电网稳定性及可靠性的影响以及相应的控制策略研究；④微电网相关运行及设计标准的研究，针对分布式发电及微电网的电力系统分析工具的开发；⑤微电网示范工程建设的研究。

weizhang yongdian

违章用电　（transgression of using electricity）　危害供用电安全，扰乱供用电秩序的用电行为。在供用电双方签订的供用电合同中订有禁止这些行为的约定，因此也称违约用电。违章用电轻者造成供用电秩序的混乱，使供电企业或其他用户的利益受到损害；重者会引起电网事故，造成供电中断，甚至引起人身伤亡或财产的损失。因此，世界各国都明令禁止违章用电，并给予违章者一定的处罚，这也是供用电管理的惯例。《中华人民共和国电力法》第三十二条和《电力供应与使用条例》第七条、第三十条，都规定违章用电属禁止用电行为，对违章用电者也有明确的处罚规定。

违章用电行为　在中国，违章用电行为包括：①擅自改变用电类别；②擅自超过合同约定的容量用电；③擅自超过计划分配的用电指标；④擅自使用已经在供电企业办理暂停

使用手续的电力设备，或者擅自启用已经被供电企业查封的电力设备；⑤擅自迁移、更动或者擅自操作供电企业的电能计量装置、电力负荷管理装置、供电设施以及约定由供电企业调度的用户受电设备；⑥未经供电企业许可，擅自引入、供出电源或者将自备电源擅自并网。

违章用电处理　《中华人民共和国电力法》和《电力供应与使用条例》中规定，电力管理部门对违章用电者可做出“责令改正，给予警告；情节严重或者拒绝改正的，可以中止供电，可以并处5万元以下的罚款”。供电企业发现违章用电的，“可以根据违章事实和造成的后果追缴电费，并按照国务院电力管理部门的规定加收电费和国家规定的其他费用；情节严重的，可以按照国家规定的程序停止供电”。在《供电营业规则》中规定对查获的此类违章用电行为应及时予以制止外，还按违章用电不同的事实和情节，对违章者分别规定了应承担违约使用电费的法律责任。

weizhi kongzhi

位置控制　(position control)　对被驱动物体的空间位置进行自动控制的技术。位置控制的应用非常广泛，各种机械加工设备、许多工业装置都需要进行位置控制。位置控制可以是一维、二维或三维空间的位置控制。

分类　根据控制任务的不同，位置控制可分为定位控制和运动轨迹控制两类。

定位控制　控制的任务是移动被驱动物体从一个确定的位置到另一个确定位置，不管两位置之间所经过的路径。定位控制在冶金、机床制造、起重运输等技术领域得到了广泛应用。其位移轨迹特性要保证最小的位移时间（即最大生产率）和没有显著的位置超调。

运动轨迹控制　控制的任务是保证被驱动物体按规定的路径到达最终位置。如在机械加工设备上应用运动轨迹控制对工件连续不断地加工，以保证工件达到规定的轮廓。所以运动轨迹控制在机械加工领域内又叫轮廓控制。

控制系统　控制系统可分为位置开环控制系统、非直接位置闭环控制系统、直接位置闭环控制系统、计算机位置控制系统。

位置开环控制系统　一般采用步进电动机作为执行机构。步进电动机是一种将输入脉冲信号转换为输出轴的角位移（或直线位移）的执行元件，每输入一个脉冲信号，输出轴便转过一个固定的角度（或直线位移），即向前迈进了一步。因而，输出轴转过的总角度（或总位移）是与输入脉冲数成正比的，控制输入脉冲数即可控制和确定被驱动物体的位移和位置。这种控制方式不需要位置反馈，其原理框图如图1所示，由位置控制器设定其输出脉冲个数，同时设定旋转方向。



图1　位置开环控制系统原理框图

非直接位置闭环控制系统　一般采用各种交、直流伺服电动机（SM）作为执行机构。如图2所示，装在伺服电动机轴端的增量式光电编码器（也可用旋转变压器）提供位置反馈信号，并与位置控制器输出的设定位置相比较，其位置差值经控制单元和功率变换单元供电给电动机，当电动机旋转至所要求的角度时，位置差值为零，电动机停止在所要求的位置上。由于位置检测元件仅能反映电动机所旋转的角度，不能真正反映被驱动物体的位移，电动机轴与被驱动物体之间的传动机构所存在的误差（由齿轮的间隙、丝杠的不均匀度等所引起）不能考虑在内。因此，为了提高控制精度，需要通过上一级的数控设备予以补偿和修正。

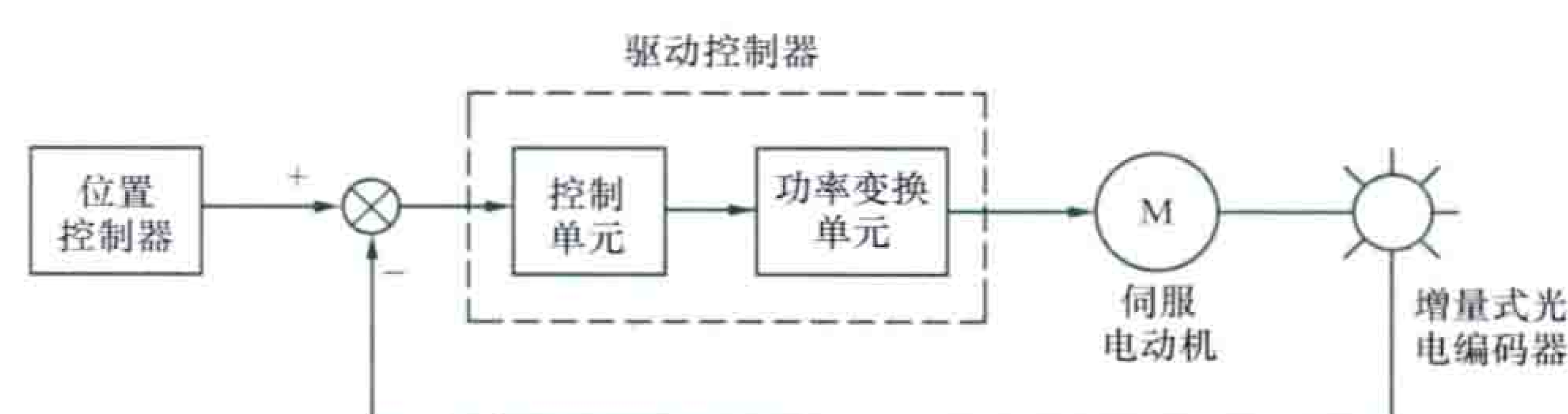


图2　非直接位置闭环控制系统原理框图

直接位置闭环控制系统　位置检测元件直接装在被驱动物体上。使用的检测元件有各种直线或旋转感应同步器等，它们已将因传动机构带来的误差考虑在内，从而直接控制被驱动物体的位置。其原理框图如图3所示。

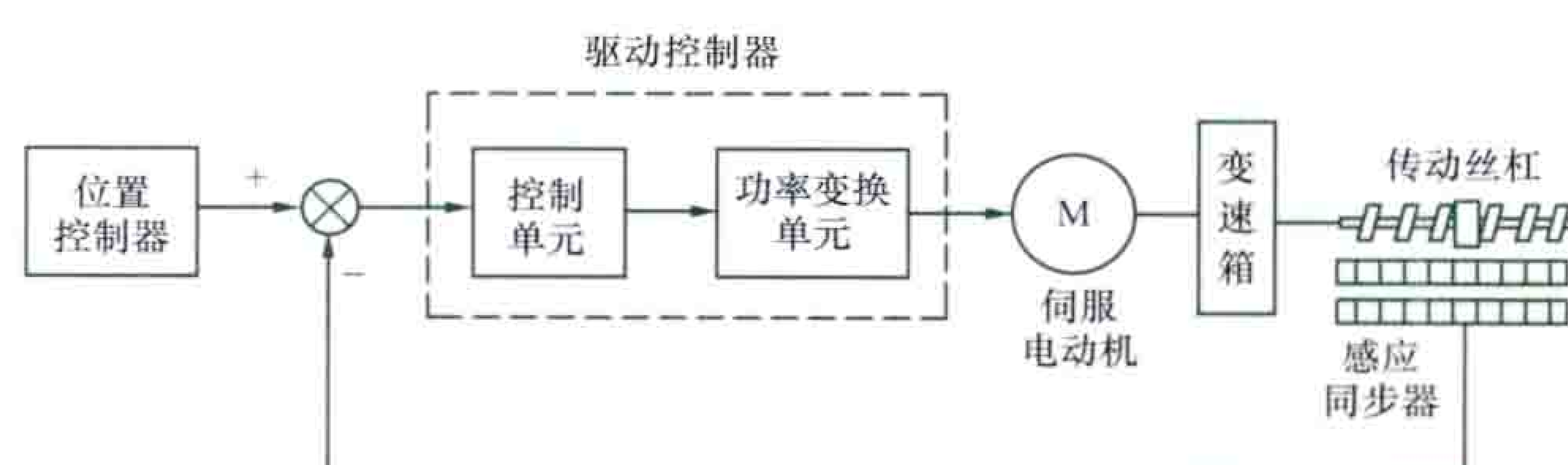


图3　直接位置闭环控制系统原理框图

计算机位置控制系统　直接数字-位置自动控制（DDC-APC）系统（一种计算机位置控制系统）框图如图4所示，所用的电力拖动控制系统是无级调速的。反馈量系利用自整角机输出经模数转换器变为数字量，与位置设定值比较后，计算机在采样周期内根据位置偏差算出电动机应有的转速，并把所对应的电压控制信号输送到转速调节器（包括在传动控制装置中），从而控制电动机的转速，使被驱动物体达到所要求的位置为止。

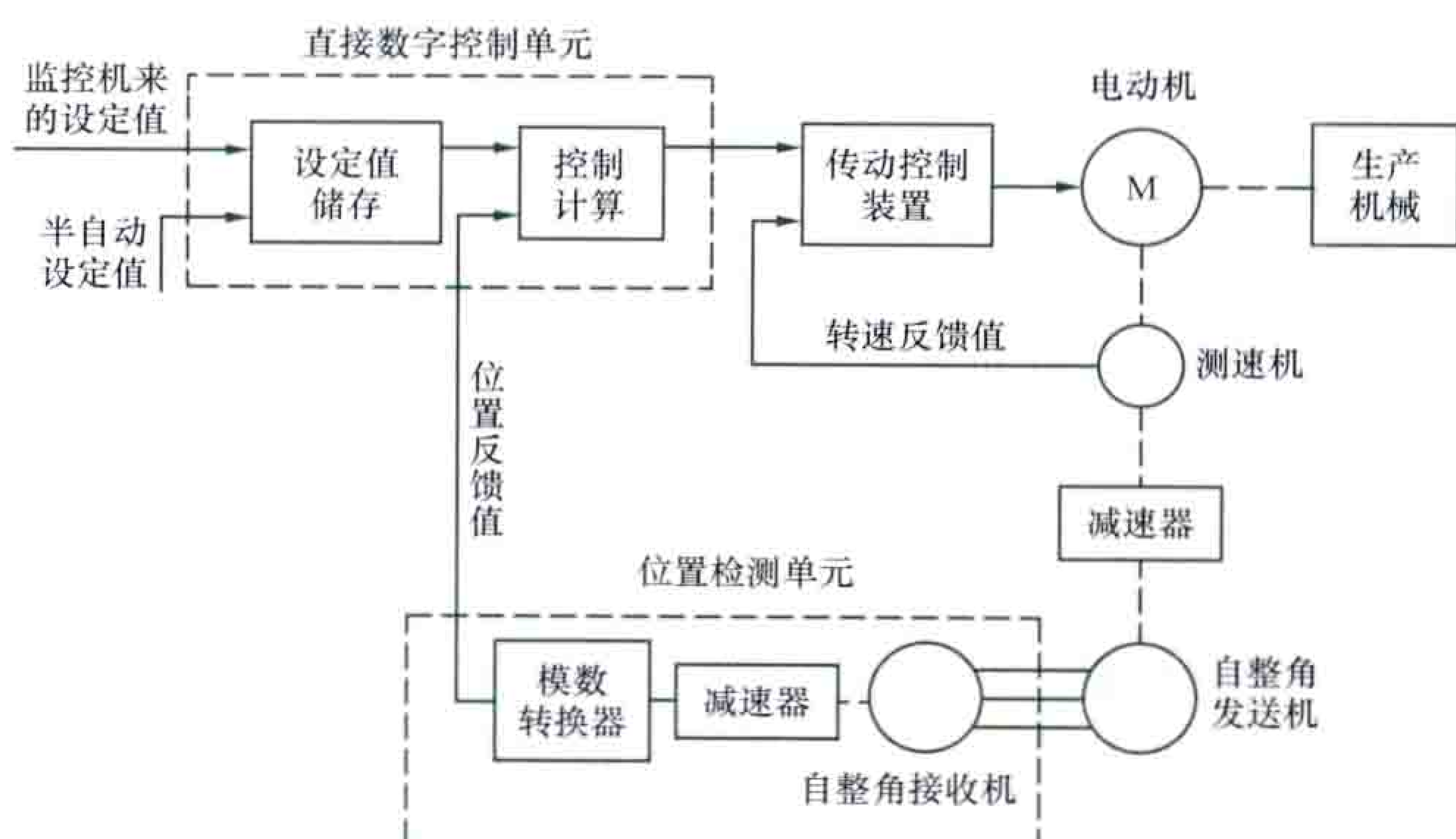


图4　采用无级调速的DDC-APC系统框图

wensu kongzhi

稳速控制　(speed stabilizing control)　能实现电动机以一定的稳速精度长期运行的转速控制技术。某些生产机械，如中型抄纸机、橡胶压延机等，为保证产品的质量，要求的稳速精度为0.2%～1%；高速纸机、微电机测试设备、

超音速风洞等，为保证测试数据的准确性，要求稳速精度为0.1%～0.01%。稳速控制还能实现负公差生产，可用同样的原料生产更多的产品。按是否带反馈环节，稳速控制可分为开环稳速控制与闭环稳速控制两大类。

开环稳速控制　一般用于控制同步电动机（M）。一般由高精度的主控频率源和功率放大器组成开环稳速系统，如图所示。电动机的转速取决于主控频率。为保证要求的稳速精度，主控频率的稳定度应比稳速精度高一个数量级。且主控频率值应是可调的，以满足调节转速的要求。主控频率源的频率控制器有四种：①石英晶体振荡器配以可变分频器。分级较粗，且分布不匀。②石英晶体振荡器配以频率合成器。频率稳定度高，能满足各种稳速控制要求，但线路复杂，价格较贵。③LC振荡器或RC振荡器。可用于稳速精度要求不高的场合，如采用温度补偿措施，频率稳定度可以有所提高。④石英晶体振荡器配以数字控制器。功率放大器采用电力电子变换器实现，数字控制器根据石英晶体振荡器得到时钟信号，再根据控制对象的要求控制电力电子变换器的工作状态，线路简单，灵活性好，是最常用的方式。

主控频率源 → 功率放大器 → M

开环稳速控制

开环稳速控制可得到很高的静态精度，但动态特性不易调控，因而适宜于没有负载波动的精密试验设备的控制。

闭环稳速控制　带有实际转速反馈量的稳速控制。当实际转速偏离给定转速时，给定转速与反馈转速比较产生偏差信号，经过调节器作用控制功率部件，从而使实际转速保持转速给定值。

闭环稳速控制的精度取决于转速反馈信号的精度。早期的转速反馈信号利用测速发电机获取，其稳速精度约为1%。采用较高精度的测速发电机，稳速精度可提高到0.2%～0.3%。在数字控制中，转速反馈信号一般利用光电编码器或者旋转变压器获取。光电编码器输出的转速反馈为脉冲频率，旋转变压器的输出经过一定的转换电路后也可以变为数字信号，然后在数字微控制器中把两个信号进行比较，并通过电流调节器控制电动机的转速。采用光电编码器或者旋转变压器的转速反馈信号精度较高，可达0.01%～0.02%。

wenyaqi

稳压器

稳压器　（voltage stabilizer）　能稳定电源电压的电器。当电网电压或负荷发生变化时，稳压器能使供给负荷的电源电压近于恒定。在电力系统中，稳压器常用在对供电电源电压稳定性要求较高的场合。稳压器按输出电压分为直流稳压器和交流稳压器两类。

直流稳压器　将交流电或不稳的直流电转化为稳定的直流电压输出的电器。直流稳压器主要有线性稳压器和开关稳压器等。

线性稳压器　图1所示为线性稳压器原理框图。图中电源变压器和整流滤波电路的作用是将交流电压经变换电压后，由整流电路变为直流，再经滤波电路消除一定纹波加于稳压电路的调整管上。假若输出电压 U_o 随输入的不稳定直流电压 U_{di} 或负荷电流 I_L 的变化而发生变化时，采样反馈电路和比较放大器能将变化的信号加以放大，送给调整管，使调整管的管压降发生相反的变化以抵消输出电压的变化，从而维持输出电压的稳定。

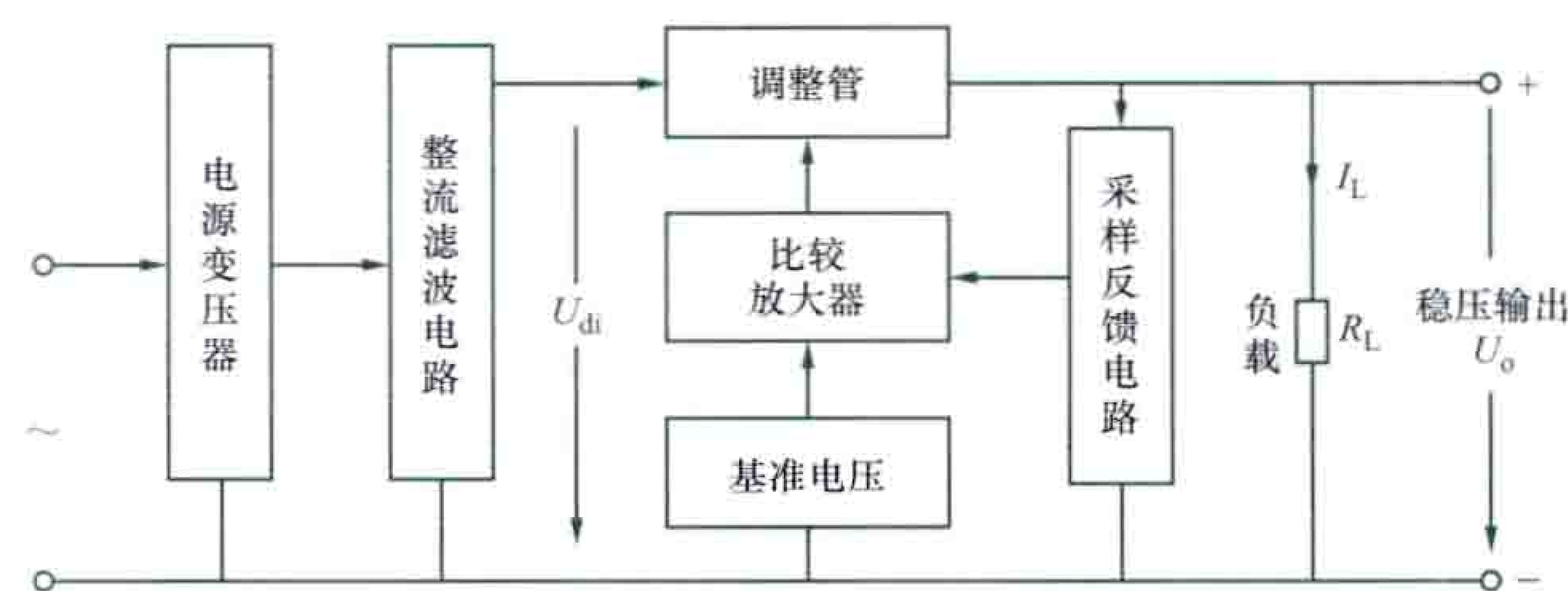


图1　线性稳压器原理框图

线性稳压器的特点是稳压精度高、输出阻抗低、纹波脉动小、能输出比较大的电流，但稳压器中的调整管必须始终工作于线性放大区才有稳压作用，因此，它的功率转换效率比较低。

开关稳压器　图2所示为脉宽调制型开关稳压器的原理框图。图中调整管是以开关方式进行工作的，其输出电压 $U_o=U_{di}\frac{T_{on}}{T}$。当输入电压 U_{di} 或负载电流 I_L 发生变化使输出电压 U_o 变化时，通过采样反馈电路和脉宽调制控制器使调整管的导通时间 T_{on} 发生相反的变化从而使输出电压 U_o 维持稳定。由于开关稳压器中调整管饱和导通时的管压降很低，截止时流过的电流很小，在开、关工作过程中调整管上的损耗很小，所以开关稳压器的效率高达80%以上。开关稳压器的功率密度高，并能输出单个或多个电压，输入电压可以大于或小于输出电压，也就是说既可升压稳压，也可降压稳压。但其稳压精度比高精度的线性稳压器低，输出电压中的纹波脉动也较大，瞬时恢复时间较长，同时还产生电磁干扰。

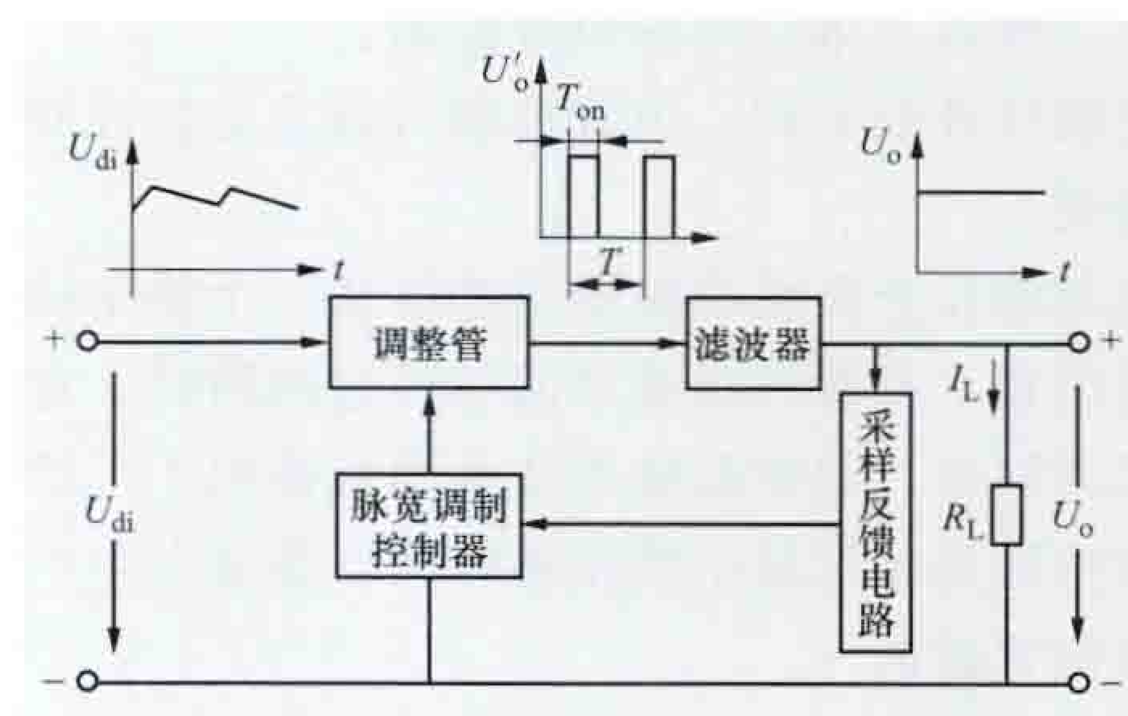


图2　脉宽调制型开关稳压器原理框图

交流稳压器　将电网的交流电压转化为稳定的交流输出电压的电器。交流稳压器按工作原理主要分为铁磁谐振式稳压器、稳压变压器、磁放大器式稳压器、数控式稳压器、净化式稳压器等。

铁磁谐振式稳压器　亦称磁饱和式稳压器。图3(a)所示为非线性电感 L_s 和线性电容 C 的并联铁磁谐振电路，其伏安特性曲线如图3(b)所示。图中 $U_C(I)$ 为线性电容的伏安特性曲线；$U_{Ls}(I)$ 为非线性电感 L_s 的伏安特性曲线；

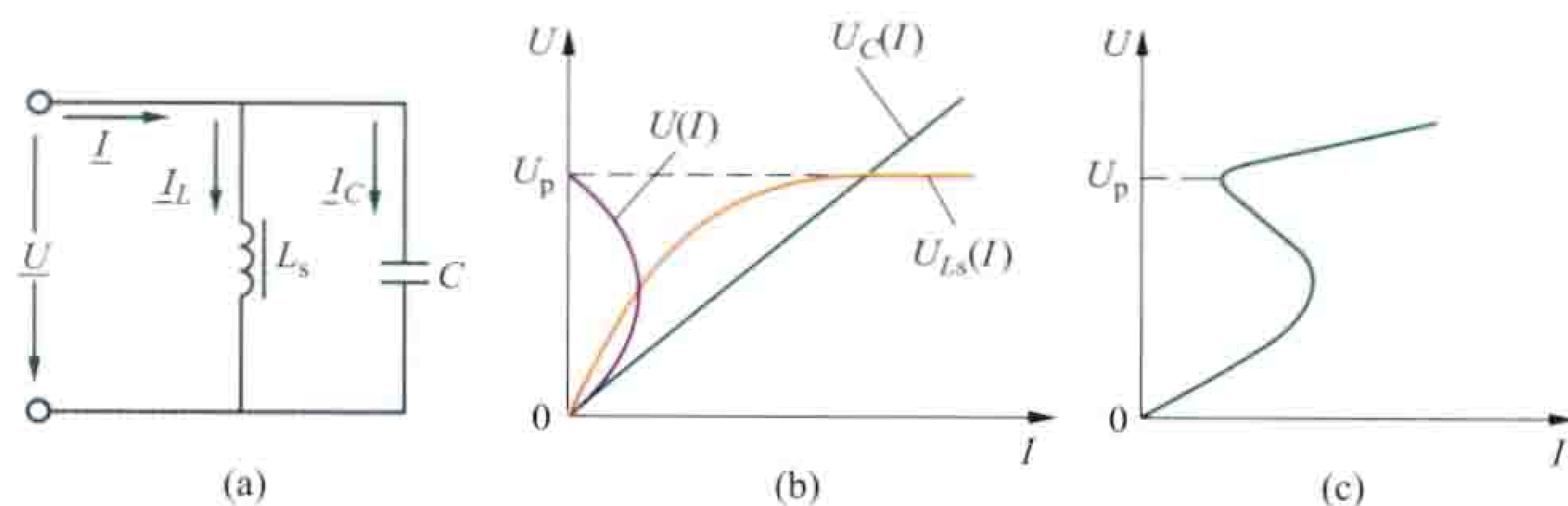


图3　非线性电感和线性电容的并联电路及其伏安特性
(a) 电路；(b) $R=0$ 时的伏安特性；(c) $R\neq0$ 时的伏安特性

$U(I)$ 为铁芯电感线圈 L_s 和电容 C 在其电阻 $R=0$ 时，并联谐振电路的伏安特性曲线；U_p 为其谐振点电压值。

当 $R\neq 0$ 时，伏安特性曲线如图 3（c）所示。由图可见，当并联电路一旦进入谐振后，只要 $U>U_p$，线圈的铁芯就处于深度饱和状态。这时，它对外加电压有效值的变动反应十分“迟钝”，因此只要外加电压的最小值大于 U_p，它就具有稳压作用。

图 4 所示为一简单并联式铁磁谐振交流稳压器的原理图。图中 L 为一线性电感，其伏安特性 $U_L(I)$ 和并联谐振电路的伏安特性 $U_o(I)$ 如图 4（b）所示。图 4（c）为输入电压的伏安特性 $U_i(I)$，它是由图 4（b）中 $U_L(I)$ 和 $U_o(I)$ 在同一电流坐标下相加得到的。由图可见，在 $U>U_p$ 内，$U_i(I)$ 较陡，$U_o(I)$ 较平坦，因而与输入电压 U_i 的变动量 ΔU_i 相对应的输出电压的变化量 ΔU_o 很小，即 $\Delta U_o \ll \Delta U_i$。为了克服图 4（b）伏安特性曲线在 $U>U_p$ 这段中的上倾，使特性曲线变得更平坦，达到进一步提高稳压精度的目的，通常采用一线性补偿线圈 L'，将输入电压的一部分反向叠加在输出电压上，电路如图 5 所示。

图 4　简单并联式铁磁谐振交流稳压器原理图

（a）电路图；（b）$U_L(I)$、$U_o(I)$ 伏安特性曲线；（c）$U_i(I)$ 伏安特性曲线

在图 5 中，$U_o=U'_o-U'_L$，U'_L 正比于电流 I，其伏安特性如图 5（b）所示。将 $U'_o(I)$ 和 $U'_L(I)$ 在同一电流坐标下相减即可得到 $U_o(I)$，显然，由于补偿线圈的补偿作用，克服了输出特性的上倾，使 ΔU_o 进一步减小，稳压精度进一步提高。

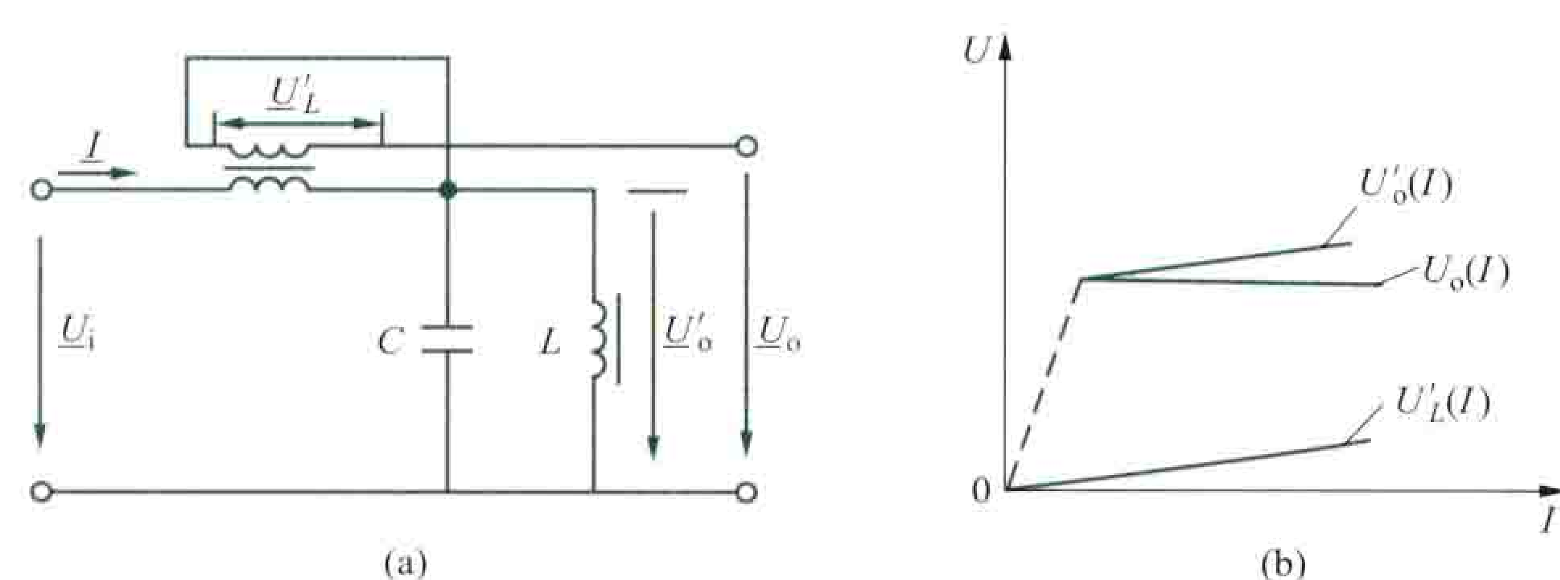


图 5　带有补偿线圈的交流稳压器原理图

（a）电路图；（b）输出特性

这种稳压器结构简单，制造方便，过载能力较强，价格便宜，但是波形失真较大，稳定度不高，通常用于稳压要求不太高的场合或作预稳稳压器。

稳压变压器（constant voltage transformer，CVT）　由单一铁芯同时实现稳压和变压双重功能的电器。它在结构上类似于普通电源变压器，所不同的是，它具有磁分路和二次谐振回路。磁分路的作用是将输入绕组和输出绕组所在的磁路分开，这样就使二次绕组所在铁芯由于铁磁谐振而处于饱和状态时，一次绕组所在铁芯仍处于非饱和状态。在图 6（a）所示的结构上，C 形铁芯的窗孔中填塞一组用同样材料制成的磁分路铁芯，使铁芯有 2 个窗口，3 条磁路，一次绕组占一个窗口，二次绕组与谐振绕组同占一个窗口，谐振绕组与外接电容 C 连接，组成谐振频率与电源频率相接近的谐振回路。由于谐振回路的作用，二次磁路处于饱和状态，二次绕组上的感应电动势基本不受电源电压有效值变动的影响，从而实现稳压作用。图 6 给出了稳压电路原理图及等效电路图。

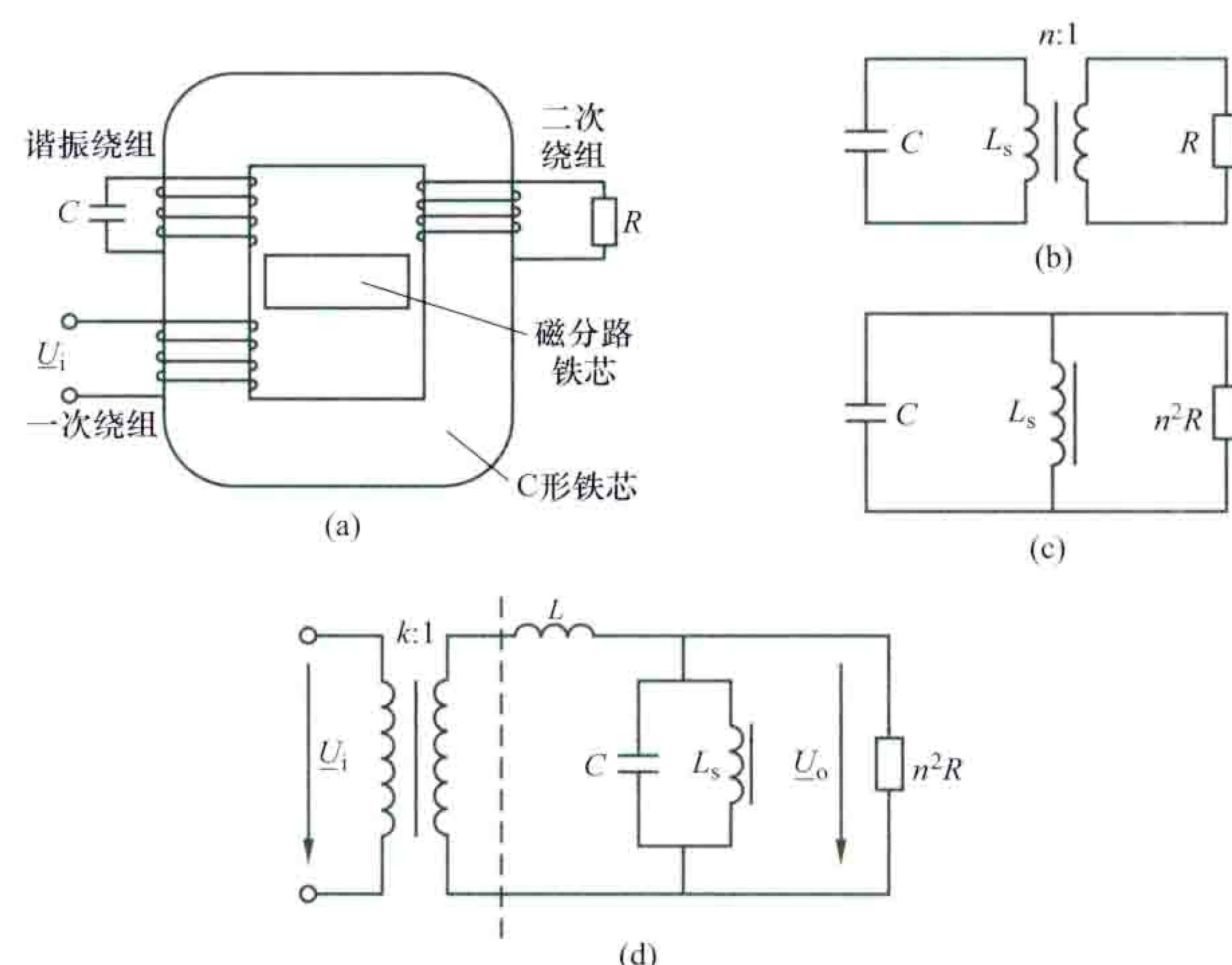


图 6　稳压变压器的原理图及等效电路图

（a）原理图；（b）二次的两个回路；（c）二次等效电路；（d）稳压变压器等效电路

与磁饱和式稳压器一样，稳压变压器也是利用 LC 组成铁磁谐振回路来实现稳压的，只是它的主磁路是封闭的，泄漏较少，所以它对电子仪器的干扰比磁饱和式稳压器要小得多。由于它具有较大的时间常数，故对外来冲击干扰具有一定的缓冲作用。其缺点是在电源频率变化过大时，会影响稳压性能。小功率电子仪器所采用的简单交流稳压器，多数都是稳压变压器。

磁放大器式稳压器　利用电子线路改变磁放大器的阻抗，以稳定交流输出电压的电器。图 7 所示为磁放大器式稳压器的原理框图。

磁放大器式稳压器主要由直流控制回路和交流调整电路组成。直流控制回路由采样电路、基准电压、比较电路和直流放大器组成，交流调整电路由磁放大器和变压器串联组成。磁放大器是具有非线性特性的铁磁材料制成的铁芯，并受交流电流和直流电流同时励磁，以进行电量变换的电器。在直流线圈上只要有微弱的直流励磁电流（控制电流）变化，就能在其交流线圈上引起较大的交流励磁电流的变化，此即磁放大器的放大作用。在磁放大器中，当控制电流 I_c 增

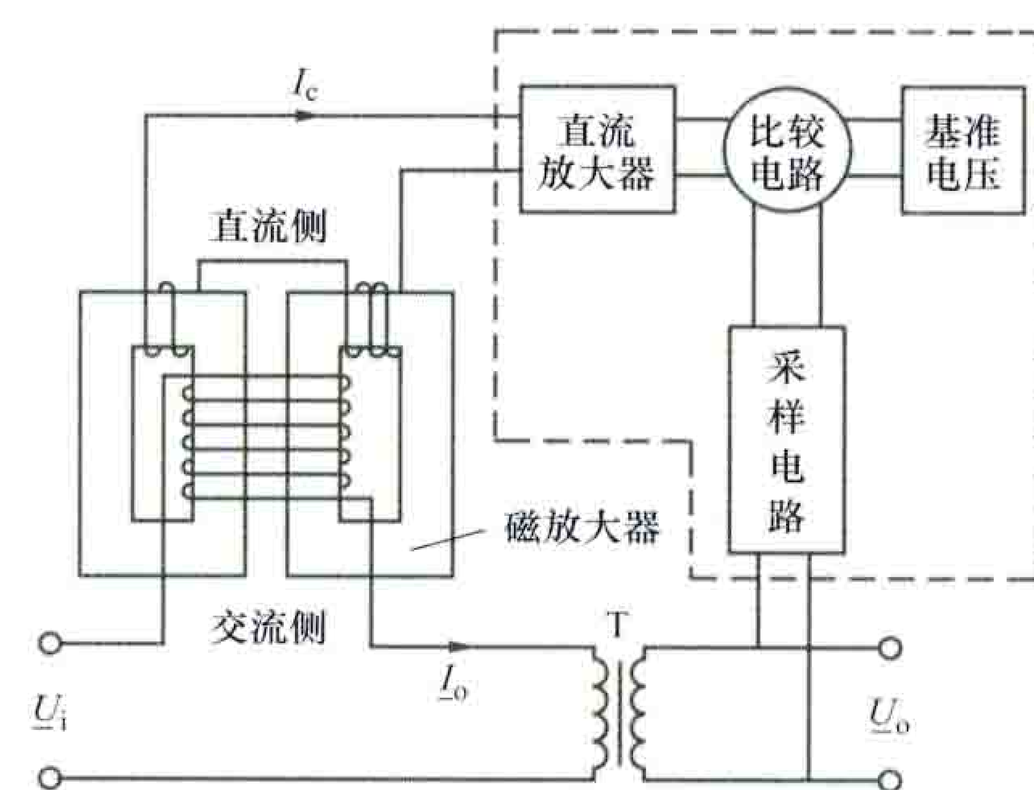


图 7　磁放大器式稳压器原理框图

大时，其交流线圈中的电流有效值 I_{c} 将随之增大，交流线圈的等值感抗 X_{c} 将随之减小；反之亦然。因此，磁放大器交流线圈和变压器一次绕组相串联可实现交流输出电压的自动调整，从而达到稳定输出电压的目的。

磁放大器式稳压器中的直流控制回路最早由电子管组成，以后用晶体管代替电子管，20 世纪 80 年代后采用集成电路。

这类稳压器带有反馈控制的闭环系统，稳定度高，但因磁放大器的惯性大，恢复时间长，电路中又无滤波器，所以抗干扰能力较差。

数控式稳压器　用逻辑元件或单片机组件构成控制电路，按一定编码方式转换变压器抽头，使输出电压获得稳定的电器。它具有体积小、质量轻、效率高、波形失真小等优点。

净化式稳压器　亦称正弦能量分配式稳压器。在图 8 所示其原理图中，正弦能量分配器和大功率电感相并联，正弦能量分配器在每半周的期间内以正弦电流的形式向大功率电感输入能量。当电感上由于获得能量所产生的电压和电网电压正向串联时，输出电压升高；反之，当电感上由于获得能量所产生的电压和电网电压反向串联时，输出电压降低。因此，只要根据输出电压的变化，控制正弦能量分配器向电感提供能量的大小及方向，即可达到稳压的目的。它的稳定度可达 0.1%～1%。

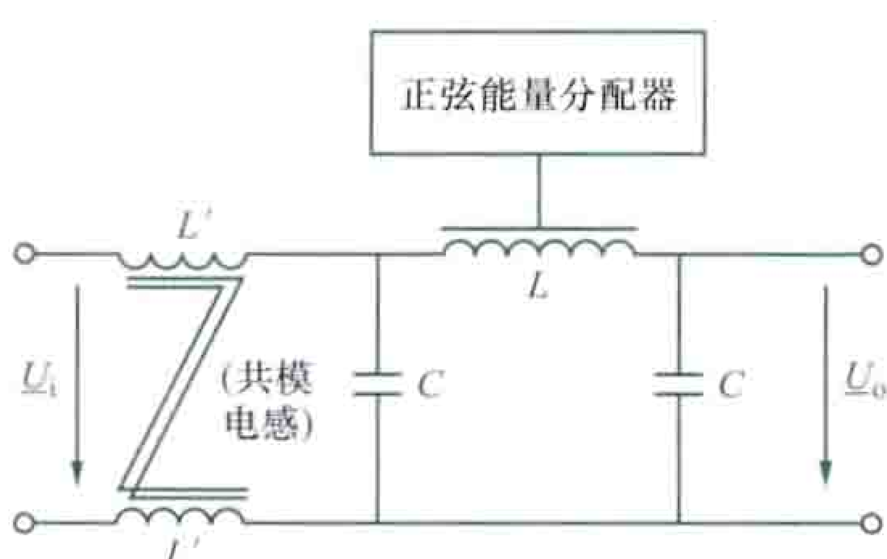


图 8　净化式稳压器原理图

由于这种稳压器中没有变压器，所以电网一旦出现半周失压状态时，不会在电路中造成浪涌电流，因此输出电压能在较短时间内得以恢复。净化式稳压器铁损很小，效率高达 95%～97%，又由于主回路是大电感和电容组成的低通滤波器，与输入交流电压之间还串接共模电感 L' 组成的抑制共模干扰的电网滤波器，所以具有良好的抗干扰能力，常用于计算机和一些对交流干扰敏感的电子仪器中。

wuchudian kaiguan

无触点开关

（non-contact switch）　靠改变电路阻抗值的变化，阶跃地改变负荷电流，而完成电路通断的一种开关电器（见低压电器）。无触点开关的主要特点是没有可运动的触头部件，导通和关断时不出现电弧或火花。无触点开关分为磁放大器式无触点开关，电子管、离子管式无触点开关，半导体无触点开关。

磁放大器式无触点开关和电子管、离子管式无触点开关已较少使用。

半导体无触点开关是由微电子电路、分立电子器件、电力电子功率器件组成的一种开关电器，又称为固态继电器，已广泛应用于计算机外围接口设备，调温、调速、调光、电机控制、电炉加温控制、电力石化、医疗器械、金融设备、煤炭、仪器仪表、交通信号等领域。

半导体无触点开关的优点是：①寿命长、可靠性高。因半导体无触点开关没有机械零部件，其寿命几乎与开关次数无关，并能在高冲击、振动的环境下工作。②控制功率小，电磁兼容性好。③切换速度快，可从几毫秒至几微秒。④电磁干扰小。半导体无触点开关没有输入线圈，没有触点燃弧和回跳，因而减少了电磁干扰。大多数交流输出的半导体无触点开关是一个零电压开关，在零电压处导通，零电流处关断，减少了电流波形的突然中断，从而减少了开关瞬态效应。

半导体无触点开关的缺点是：①导通后的管压降大，晶闸管或双向晶闸管的正向降压可达 1～2V，一般功率场效应管的导通电阻也较机械触点的接触电阻大。②关断后仍可有数微安至数毫安的漏电流，不能实现理想的电隔离。③功耗和发热量大。④大功率无触点开关的体积大，成本高。⑤电子元器件的温度特性和电子线路的抗干扰能力较差，耐辐射能力也较差，需要采取有效措施。⑥对过载有较大的敏感性，必须用快速熔断器或 RC 阻尼电路对其进行过载保护。其负载受环境温度影响，温度升高，负载能力迅速下降。⑦交直流不能通用，触点组数少，过电流、过电压及电压上升率、电流上升率等指标差。

为提高容量，出现了混合式半导体无触点开关，如混合式半导体接触器就是由有触点开关与无触点开关并联组成的，电路的通断由无触点开关的半导体器件完成，而导通后的电流主要从有触点开关流过。

wuhuanxiangqi diandongji

无换向器电动机

（commutatorless motor）　由变频器、同步电动机和位置检测器组成的电动机调速系统。无换向器电动机可分为直流-交流（包括交流-直流-交流）变频器供电的直流式无换向器电动机和交流-交流变频器供电的交流式无换向器电动机，无换向器电动机结构框图如图 1 所示。

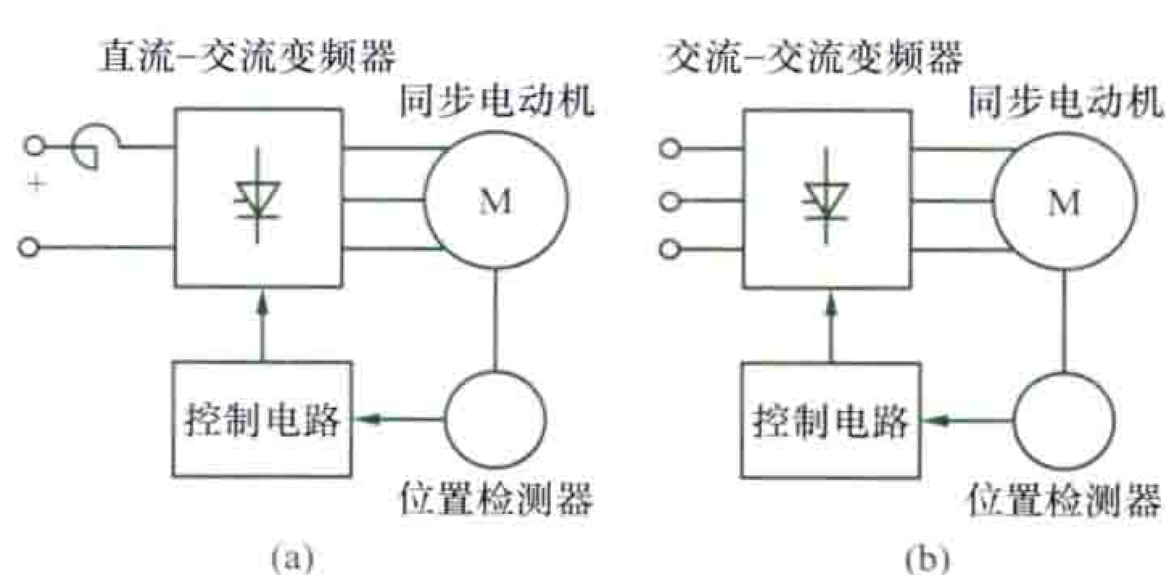


图 1　无换向器电动机结构框图

（a）直流式；（b）交流式

工作原理　无换向器电动机的简单直流电动机模型如图 2 所示，该直流电动机的电枢安放有三相对称绕组，各相绕组首端分别接至换向器上的三个换向片中的一片，末端连在一起，在几何中性线上安放一对电刷。如果将直流电流经电刷引入电枢绕组，则三相绕组中某两相绕组将有电流流过，并建

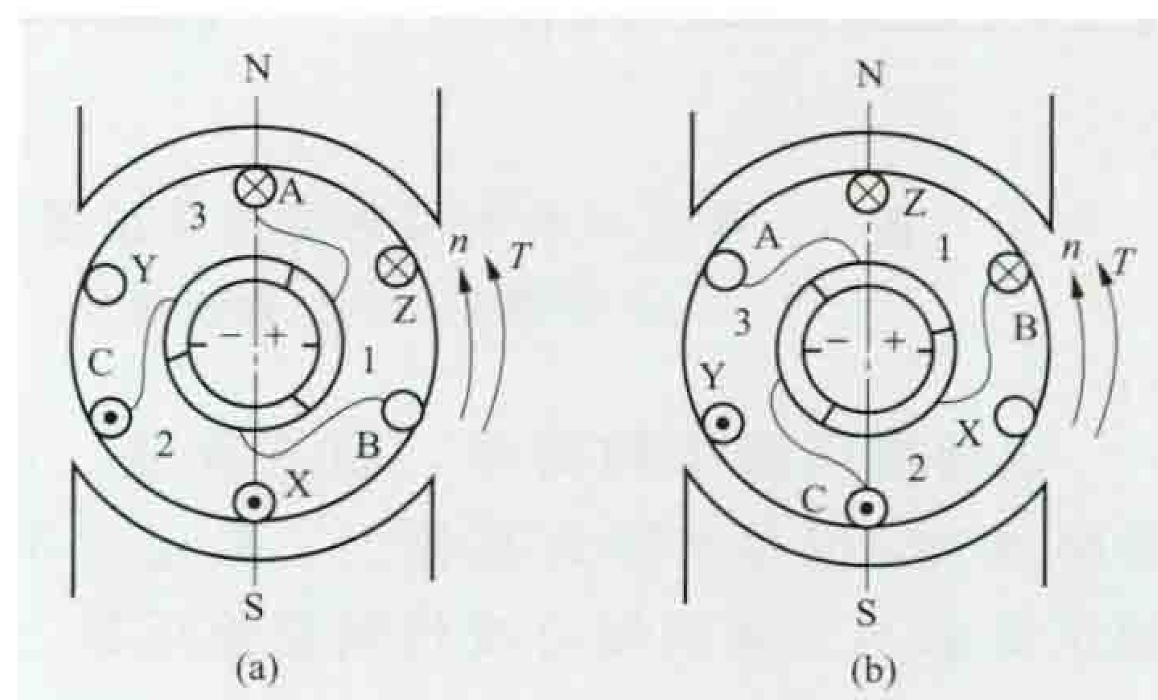


图 2　无换向器电动机的简单直流电动机模型

（a）A、C 相绕组通电；（b）B、C 相绕组通电

立相应的电枢磁场，该磁场与主极磁场作用而产生电磁转矩。与普通直流电动机相比，无换向器电动机的换向片少，绕组中电流的换向要间隔 60°，在这段时间内绕组中电流产生的磁场将随着电枢旋转而转动，与主极磁场间的相角差不是 90°，但其中间位置与主极磁场间仍相差 90°，与普通直流电动机中电枢磁场与主极磁场相差 90°类似。无换向器电动机的工作原理如图 3 所示，图中的逆变器相当于换向片，它通常为 6 只晶闸管组成的三相逆变器；安装在转子上的位置检测器相当于电刷，担负着向逆变器提供触发信号的任务。无换向器电动机的三相绕组在定子上，主极在转子上。如转子旋转 $1/p$ 转，位置检测器能发出三个相位互差 120°的 180°方波信号，通过逻辑电路形成 6 只晶闸管的触发脉冲，使晶闸管按次序并且每隔 60°换流一次，从而使三相绕相中的两相绕组交替地接通电源。三相绕组中电流变化的频率由位置检测器发出的脉冲频率决定，即由转子转速决定，因而定子旋转磁场完全与转子磁场同步，故为自同步控制频率调节。如果空载换流超前角 γ_0（基波相电流超前基波空载相电压的时间相角）正好是使电磁转矩最大时的角度，则相当于直流电动机的电刷处于几何中性线上。因此对直流式无换向器电动机，从电源的直流侧来看，逆变器、同步电动机和位置检测器相当于一台直流电动机。对交流式无换向器电动机，可认为直流环节的直流电压和电流均为等值直流电压和电流，等值的逆变器及位置检测器起到了换向器的作用。

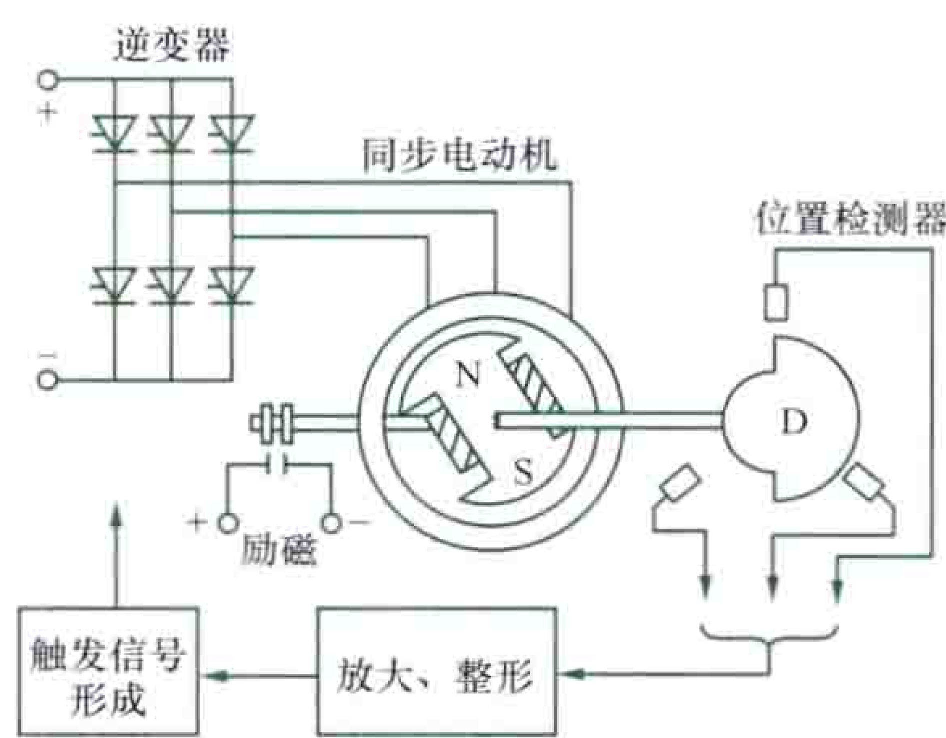


图 3　无换向器电动机工作原理

特性　无换向器电动机的转速特性与直流电动机的转速特性非常相似，可以通过改变电源电压、改变每极磁通、改变换流超前角（相当于改变直流电动机的电刷位置）实现调速，但采用后两种方法较困难。改变电源电压是常用的方法，可以通过改变整流桥的延迟角来实现。无换向器电动机的机械特性与直流电动机的机械特性也非常相似，其机械特性的硬度较直流电动机特性稍软。一般无换向器电动机在开环控制时，调速范围可达 10：1～20：1。

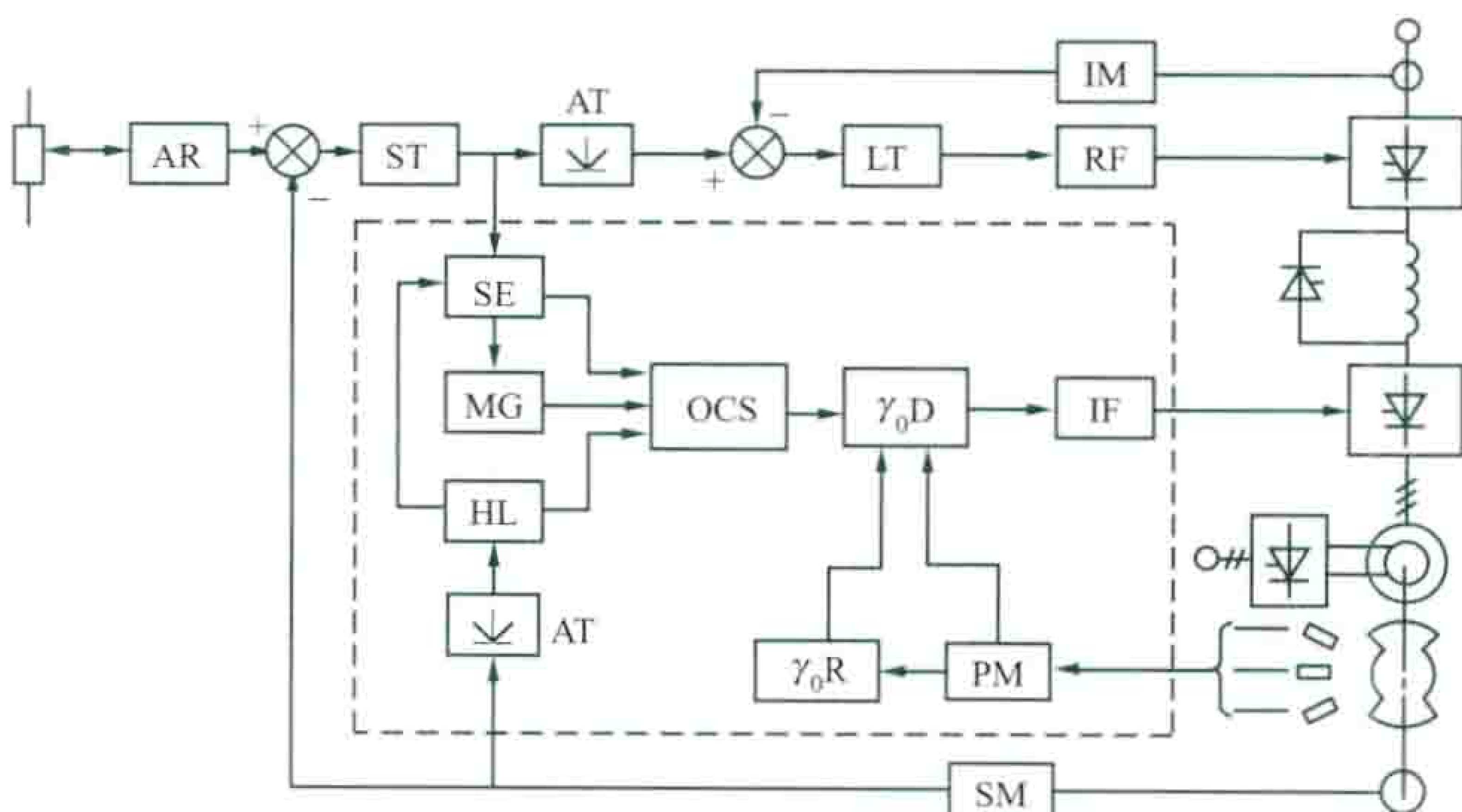
wuhuanxiangqi diandongji tiaosu

无换向器电动机调速　(speed control of commutatorless motor)　采用位置检测器对变频器进行自同步控制实现同步电动机调速的技术。自同步控制系利用装在转子上的位置检测器使逆变器的晶闸管按一定顺序触发，晶闸管导通的控制取决于位置检测器的输出信号，即取决于转子位置。导通的变化频率（变频器输出频率）由电动机本身的转速决定，定子电流建立的磁通势的旋转速度完全与转子转速同步，因而称自同步控制。

变频器　无换向器电动机调速的变频器，一般有交流-直流-交流电流型变频器、交流-交流电流型变频器、交流-交流电压型变频器 3 种。交流-直流-交流电流型变频器和交流-交流电流型变频器是依靠电动机定子绕组反电动势自然换流，因而过载能力小。当然，当电动机起动或低速运行时，电动机反电动势太小，不可能实现自然换流。这时交流-直流-交流系统常采用断续换流法，即将整流侧的控制角推入逆变状态，逆变器的输入电流迅速下降至零，晶闸管中电流小于维持电流后自行关断。交流-交流系统常采用电源电压换流法（见变频调速）。交流-交流电压型变频器则完全采用电源电压换流法，过载能力较大。就输出频率而言，交流-直流-交流电流型变频器的输出频率不受限制，交流-交流电流型变频器可为0～2 倍电源频率，交流-交流电压型变频器只能在 1/3～1/2 电源频率以下。除此之外，三种变频器在电流波形、变换效率、电动机或电源的功率因数等方面，都有一定的差异。

运行方式　无换向器电动机具有和直流电动机一样的良好调速性能，可以方便地实现四象限运行。变频器的整流器必须与逆变器协调控制，当逆变器工作在逆变状态时，整流器必须工作在整流状态；当逆变器工作在整流状态时，整流器必须工作在逆变状态。就交流式无换向器电动机而言，应在一次变换中完成上述二次变换的过程，即是由移相触发控制角和换流超前角综合决定的电动机运行方式。

控制系统　以交流-直流-交流电流型无换向器电动机为例，其双闭环控制系统框图如图所示。图中各环节对不同的运行方式处于不同的状态，以电动机正转减速说明其工作过程。设电动机原来运行于能借助反电动势换流的高转速，施加减速信号，ST 将输出负信号，SE 输出端为“1”态（对应—Δn 及正向转动），MG 输出端为“1”态（对应制动方式），OCS 转变为“正高制”（正向转动、高速、制动），使 γ_0 控制空载换流超前角为 120°（即大于 90°的正向制动工作状态），通过 IF 触发逆变器，使电动机减速。如果要继续减速到低速甚至零速时，当电动机按上述过程减速到反电动势换流的最低整定速度（高、低速的界限）时，HL 输出端变为“1”态（低速），因 MG 输出端为“1”态（制动），OCS 转变为“正低制”（正向转动、低速、制动），逆变器换流由反电动势自然换流改为断续换流，电动机继续制动运行，当



交流-直流-交流电流型无换向器电动机双闭环控制系统框图
AR—给定积分器；ST—转速调节器；AT—绝对值变换器；IM—电流检测环节；LT—电流调节器；RF—整流移相触发器；SE—转速差及正、反转状态检测环节；MG—电、制动检测环节；HL—高、低速检测环节；OCS—运转状态合成环节；γ_0D—γ_0 脉冲分配器；IF—逆变触发器；γ_0R—γ_0 自动调节器；PM—位置检测器；SM—转速检测环节

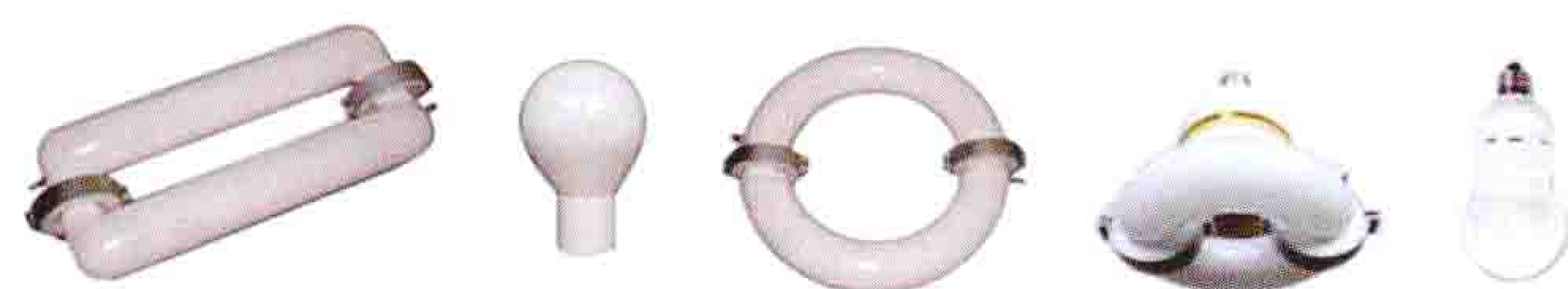
转速降低至略低于给定值，ST 输出端恢复正信号，OCS 转变为“正低电”（正向转动、低速、电动），电动机在正向低速下作电动运行，最后稳定在所设给定值及负载下。如果正向减速一直到零，则 OCS 一直处于“正低制”状态，直到电动机完全停止为止。

交流-交流直接变频无换向器电动机调速，其控制信号一个来自位置检测器，一个来自电源侧的相位触发器。位置检测器决定应该工作的元件组；移相信号决定某组内哪个元件导通。上述两种信号通常用一个与门逻辑电路加以综合，以决定某时刻哪个晶闸管导通，从而保证要求的电动机运行方式。除上述控制系统外，还有换流超前角和励磁电流自动控制系统，带 d、q 轴电枢电流控制的交流-交流电压型系统，矢量变换控制系统等。

特点及应用　无换向器电动机调速不存在失步问题，容易实现四象限运行，具有直流电动机那样优良的调速与控制性能，同时无换向器电动机本身又具有交流电动机的结构简单坚固、运行可靠、维护方便等优点，故在高转速、大容量以及恶劣环境等场合获得了广泛的应用。如应用于风机、泵、挤压机等单独可变速传动系统，造纸机、卷绕机、加工机、延伸机等有两台以上电动机的复式控制传动系统。除上述一般的调速传动外，还可将无换向器电动机原理用于蓄能电站发电电动机组及大型同步电动机的起动装置，即装设一套变频装置，与待起动的同步电动机构成一台无换向器电动机，采用无换向器电动机的起动方法起动，完全避免了同步电动机利用阻尼绕组起动时对电网所产生的冲击；同时起动装置的容量仅为被起动机组的额定功率的 5%～7%，减小了起动装置的容量，装置便于维护。也可用于变频电源，通过调节无换向器电动机的转速，改变自控变频器的输出频率和电压，用以供给其他交流异步电动机，实现转速的协调运行。

wuji yingguangdeng

无极荧光灯　(electrodeless fluorescent lamp)　一种不带电极，以电磁耦合的方式给低压汞蒸气提供放电能量的荧光灯。无极荧光灯（见图）的发光原理与荧光灯略有不同，灯内没有装配钨丝或电极，而是通过感应线圈将高频（20～3000kHz）电磁能量耦合到充有氩气和低压汞蒸气的放电空间中，由于电磁场的频率足够高，放电空间的电子就在它所处的位置发生振动。只要电磁能量足够强，电子虽然移动距离不远，但仍能积蓄足够能量使汞分子发生电离和激发，当汞原子从激发到高能级状态返回到基态时，就能辐射出 253.7nm 紫外线，辐射到涂以三基色稀土荧光粉的玻壳内壁上，就会形成日光色的可见光辐射。



各种无极荧光灯

通常无极荧光灯的灯管是一个真空放电腔体，它的一端设置汞齐（固态汞合金），放电腔内填充缓冲放电气体，形成连续的闭合放电环路，放电管通过环形铁氧体磁芯的中心轴线。由于无极灯消除了电极因素的影响，灯的寿命有极大的提高，通常可达 40 000h 以上。同时灯的光通维持率也比普通荧光灯好一些。

分类　无极荧光灯按照磁芯环绕方式可分为内置式和外置式。

内置式无极荧光灯也称高频无极荧光灯。灯管呈球形，感应磁芯置于灯管内，被一个玻璃凹腔所保护。由于感应磁芯在泡壳内部，因此泡壳的散热处理成为一个重要问题，通常在铁磁芯内层加一铜材质导体将热量传导到灯的金属底座上实现散热，安装时保持灯底座良好的热接触可以使灯的性能更稳定。1991 年日本和荷兰分别推出了此类无极灯的商用产品，制造商认为灯的寿命可以达到 100 000h。1994 年美国推出的无极荧光灯由于结构设计的原因和采用 SnO_2 半导体涂层技术，很好地解决了电磁干扰的问题。

外置式无极荧光灯也称低频无极荧光灯。灯的感应磁芯绕在环形灯管外，与镇流器和放电腔连接。它采用管状方形放电管结构，并在放电管两端环绕带线圈的磁环。外置式无极荧光灯最大的改进是工作频率，从原来的 2.65MHz 降低到 250kHz，不但降低了电磁干扰，还降低了驱动电路的成本和设计难度。光效最高可达 80lm/W，平均寿命是 60 000h，并具有很好的启动性能。

技术参数　典型的无极荧光灯的技术参数见表。

典型的无极荧光灯的技术参数

<table>
<tr><td rowspan="2">电参数</td><td>电源电压（V）</td><td>灯功率（W）</td><td>电源频率（Hz）</td><td>功率因数</td><td>工作频率（MHz）</td></tr>
<tr><td>185～255</td><td>85</td><td>47～63</td><td>>0.65</td><td>2.65</td></tr>
<tr><td rowspan="2">光参数</td><td>初始光通量（lm）</td><td>整体发光效率（lm/W）</td><td>色温（K）</td><td>显色指数 R_a</td><td></td></tr>
<tr><td>5500±500</td><td>>65</td><td>3000～4000</td><td>>80</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">燃点特性</td><td>启动时间（s）</td><td>室温 20～25℃时，达到 30% 光输出的时间（s）</td><td>室温 20～25℃时，达到 70% 光输出的时间（s）</td><td>重复热启动时间（s）</td><td>燃点位置</td></tr>
<tr><td><0.5</td><td><0.5</td><td><60</td><td><0.5</td><td>任意</td></tr>
</table>

特点及应用　无极荧光灯具备光效较高、光色柔和、长达数万小时寿命而几乎不需做任何维护等优点，特别适用于对照明连续性要求高的场所，以及高挂或人们不容易更换光源的场所，如灯塔、广场、机场、海港和高大厂房等。但相对于其他光源，居高不下的生产成本导致其很难大范围推广应用。

wuyingdeng

无影灯　(shadowless lamp)　供医院手术室中局部手术范围照明用的无阴影特种照明灯。由于无影灯（见图 1）使用的特殊性，通常在照度、无阴影、照明范围、配光、红外辐射、安装和供电等方面都有较严格的要求。

(1) 照度。由于手术室是进行精细视觉工作的场所，根据手术时视觉工作的需求，在直径约为 300mm 的手术范围

内的局部照明照度一般应在 20 000lx 以上。为此，需要无影灯提供很高的照度水平，通常在 5000～100 000lx 之间，而且所提供的照度应当是可调节的。根据这一条件，无影灯必须使用多个高亮度，并配置高效反光器的混合照明。为了减小整个灯的体积和有效地控制光束的分布，需采用体积小的点光源，如半导体照明灯、卤钨灯等。



图 1　无影灯

（2）无阴影。为了在不同的位置和角度均能准确而迅速地施行手术，在手术工作面上要做到无阴影，同时还要求照明光束具有一定程度的聚焦深度（通常在 150mm 以上），照明的位置和方向要便于操作和调节。

（3）照明范围。无影灯光束范围的直径为 100～250mm，且根据不同的手术要求，灯的光束范围应设计为可调节的。

（4）配光。无影灯的配光要均匀，光源的显色性好，在手术的工作面上不能出现光斑，工作面上的垂直照度不得低于水平照度的 50%。

（5）红外辐射。为了减少高照度照明所产生的热量对手术创伤面的影响，要求尽量减除包含在照明光线中的红外辐射。为此，当采用卤钨灯光源时，一般采用能透过红外辐射反射可见光的冷反光器和在灯的发光口附设隔红外辐射的耐高温玻璃，以达到将红外辐射隔除的目的。而采用半导体照明灯作为光源的无影灯，由于半导体照明灯光谱中几乎没有红外波长的光线，使用更方便。

（6）安装位置。胸部外科手术使用的无影灯的照度在 60 000～100 000lx 范围内较为适宜。对于无菌手术室，为了使无影灯不致扰乱室内通气的气流组织，有的用嵌入顶棚的固定式无影灯或露出顶棚的转动式无影灯。鉴于无影灯布置在手术室的顶棚上，一般都设置 X 光装置和无菌设备的排气装置，而这些设备占据了 1/2 以上的顶棚表面，且位置又是在手术台的上方，所以需要综合考虑照明器与空气调节设备发生的矛盾，确定最佳的无影灯的结构与布置方案。图 2 所示为固定在顶棚上的2×6无影灯示意，图 3 所示为无影灯光束设计示意。

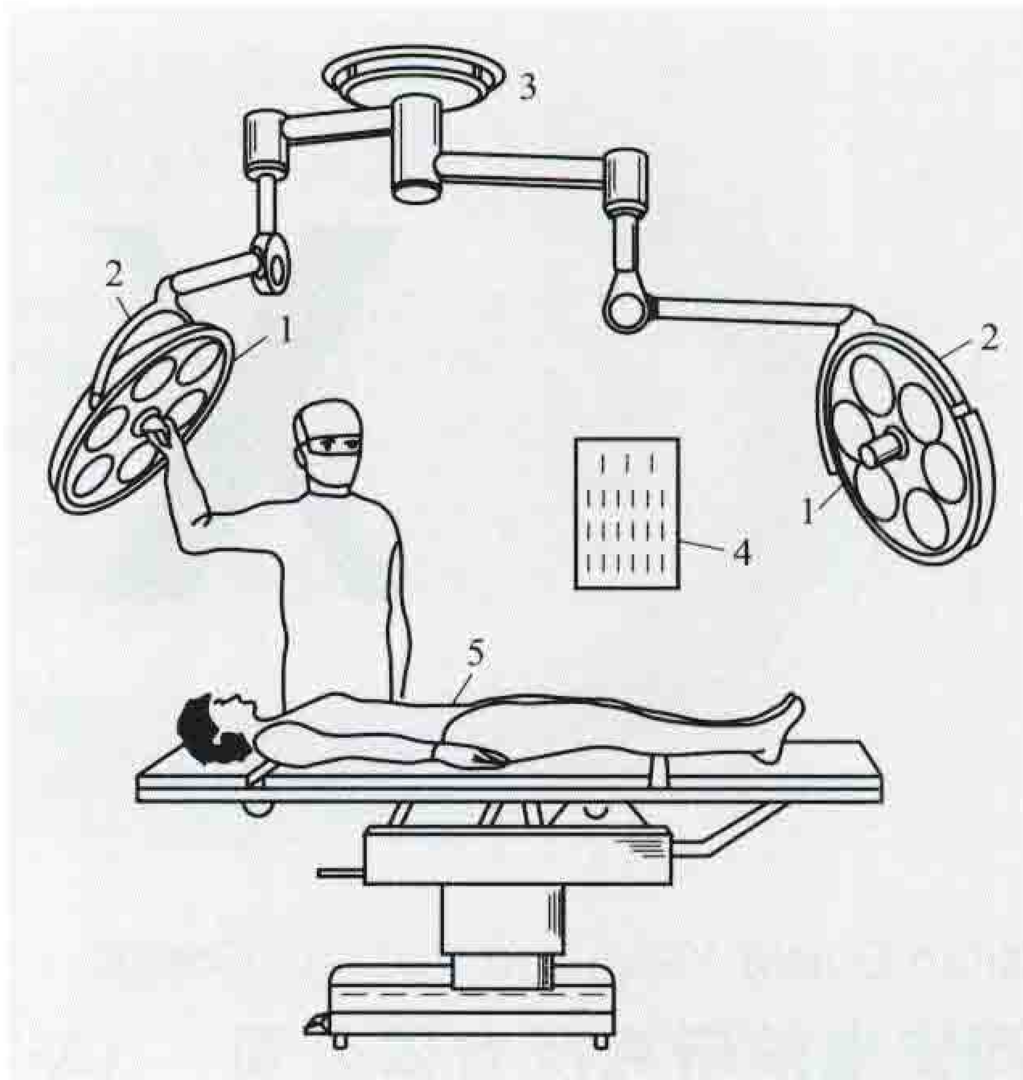


图 2　固定在顶棚上的 2×6 无影灯
1—灯具；2—灯架；3—固定盘；
4—电源控制箱；5—照射区

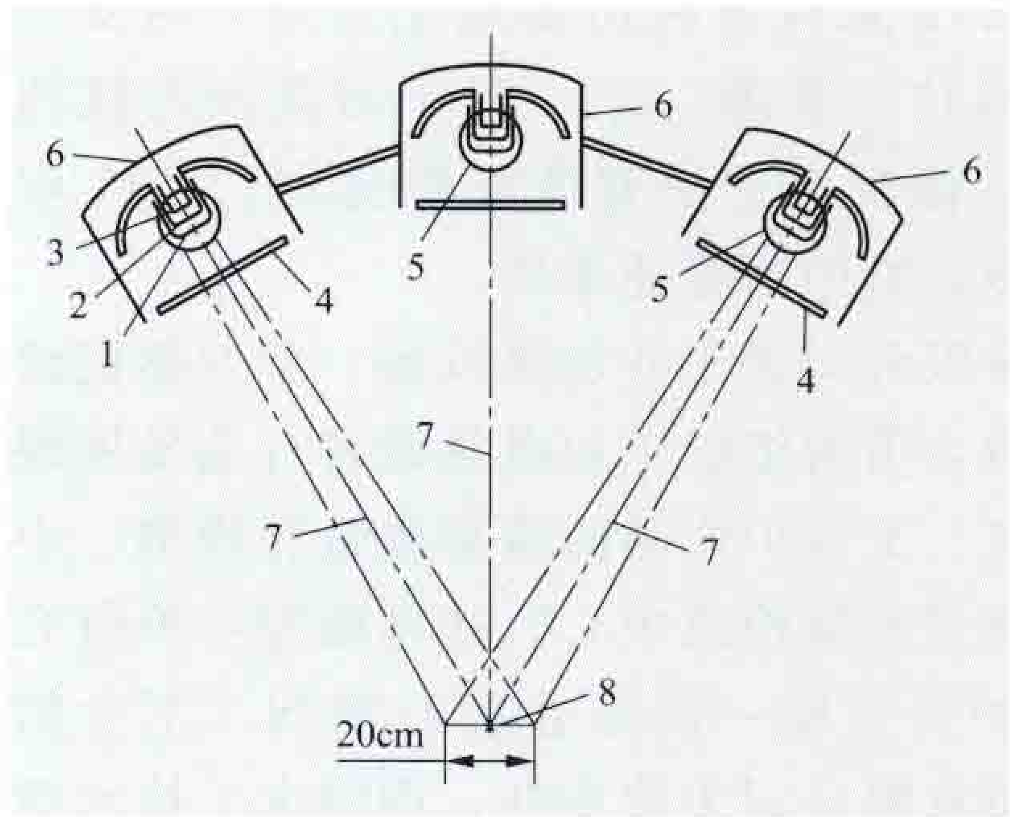


图 3　无影灯光束设计示意
1～3—光源灯丝；4—透明隔热玻璃；5—灯壳；
6—单灯外壳；7—光束中心线；8—光束光斑

（7）供电。为了确保手术安全，无影灯所用光源应具有两组。一组正常工作时使用，接在普通供电电源上；另一组为备用，接在备用电源上。当正常供电中断时，可迅速将电源切换到备用电源上。



Xi'an Dianlu Yanjiusuo Youxian Gongsi

西安电炉研究所有限公司 （Xi'an Electric Furnace Institute Co.，Ltd.） 从事工业加热设备、工业燃烧设备和炉外精炼设备的技术研发、专业设计、设备制造及工程总承包的专业化技术工程公司。其前身西安电炉研究所于1963年筹建，1965年在陕西西安正式建所，是中国唯一的国家级工业电热设备、工业炉设备专业研究所和行业技术归口单位。1999年全国242家科研院所属地化管理，西安电炉研究所划归陕西省科技厅管理，2007年中冶集团与陕西省科技厅共同组建成立西安电炉研究所有限公司，2011年中冶集团的股份全部转让给中冶赛迪集团。

西安电炉研究所有限公司是工业加热设备、工业燃烧设备的行业归口管理单位，负责组织工业电热设备行业发展规划的编制、标准的制定、工业炉产品的质量监督和检测。中国唯一的“国家电炉质量监督检验中心”挂靠西安电炉研究所有限公司；中国电炉行业唯一的专业核心期刊《工业加热》由西安电炉研究所有限公司主管主办；中国电工技术学会电热专业委员会、中国机械工程学会工业炉分会、全国工业电热设备标准化技术委员会、中国电器工业协会电炉及工业炉分会等5个全国性协会和学术团体秘书处设在西安电炉研究所有限公司。

西安电炉研究所有限公司多次承担国家及陕西省科技计划项目。其产品主要有感应炉、电弧炉、钢包精炼炉、矿热炉、电阻炉、燃气炉等多种工业加热设备，广泛应用于钢铁冶金、机械制造、有色、航空航天、核电、新材料等领域。

西安电炉研究所有限公司是高新技术企业、西安市知识产权优势企业，依托西安电炉研究所有限公司设立的中冶电炉工程技术中心、陕西省电炉工程技术研究中心等是电炉行业的研发和创新平台。

xiyouyanji

吸油烟机 （range hood） 用于收集和排除厨房烹饪产生的油烟的厨房家用电器。吸油烟机一般安装在炉灶等烹饪器具上方，用电力排油排烟。

分类 按油烟的排放方式分为外排式和内循环式；按吸油烟机安装位置（与灶台的相对位置）分为上吸式、侧吸式。

外排式吸油烟机 将吸入的含有油脂的空气排放到室外，在吸-排过程中，只有一部分油脂被分离并留在了吸油烟机的集油盒中。其排风口的出口与建筑物的排烟道或窗外连通，将油烟排出室外。

内循环式吸油烟机 吸入的含有油脂的空气经过滤分离后，油脂被留在集油盒中，清洁空气被排放到室内。与外排式吸油烟机相比，它对油脂过滤分离得更加彻底。

上吸式吸油烟机 如图1所示，安装在灶台的上方，进风口也在炉灶上方，烹饪产生的油烟沿竖直方向被吸入进风口。

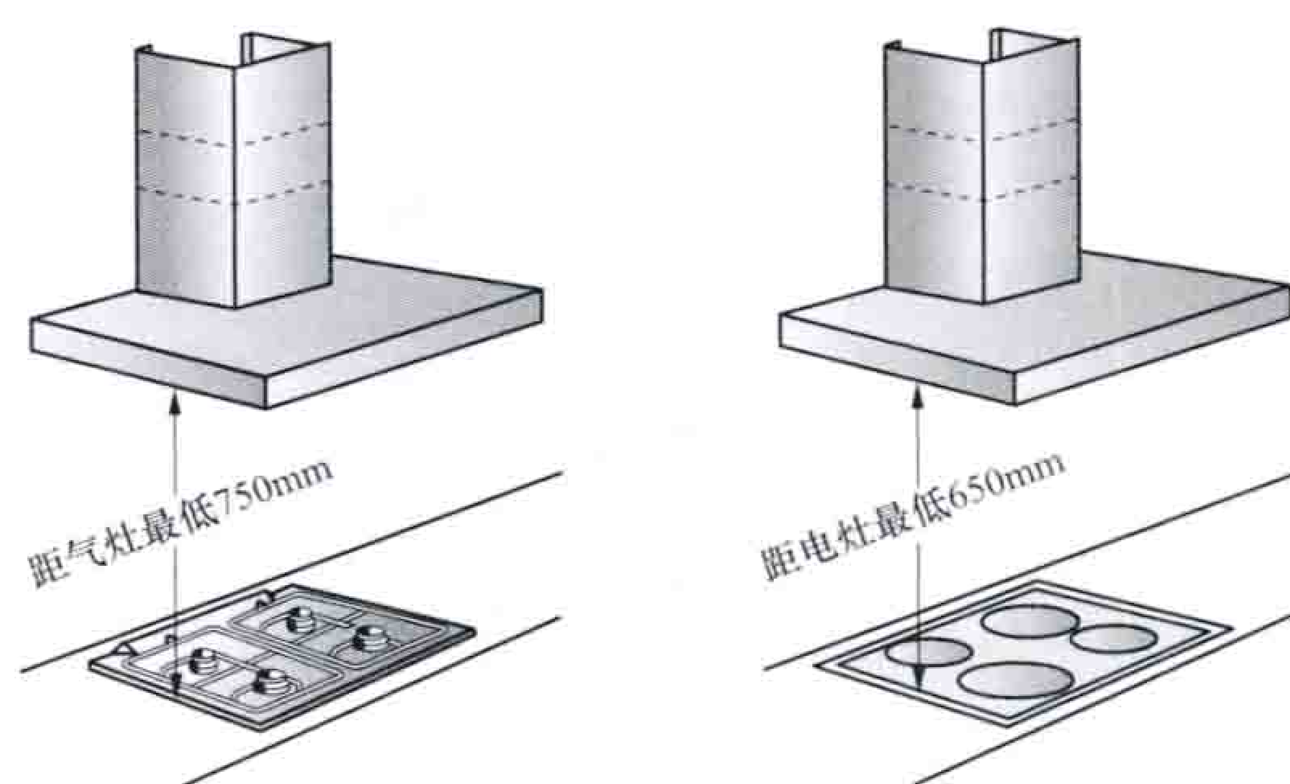


图1 上吸式吸油烟机安装示意图

侧吸式吸油烟机 安装在灶台侧面，进风口也处于灶台侧面，烹饪产生的油烟在上升过程中，被来自侧面的负压吸入进风口。因进风口与灶台距离近，油烟流经的路程短，向四周扩散的机会少，所以侧吸式吸油烟机要比上吸式吸油烟机吸烟效果好。侧吸式吸油烟机的排风口可以设计在器具的上方（上排风）或下方（下排风），见图2和图3。



图2 侧吸上排式吸油烟机

结构和原理 吸油烟机由壳体、电动机（叶轮）、蜗壳、进风口、排风口、滤网（或油脂分离装置）及电控电路等组成。电动机带动的叶轮通常采用离心式结构，可以把油烟中的油脂分离到蜗壳的边壁上去，有助于对油烟的分离净化。蜗壳和进、排风口构成了吸油烟机内部的空气通道。滤网（或油脂分离装置）置于空气通道中，起过滤分离油烟中油脂的作用。吸油烟机工作时，电动机驱动叶轮在符合空气动力学和流体力学原理的蜗壳中高速旋转，在进风口附近区域产生负压场，将在这个区域内的油烟从进风口吸入，油烟经滤网（或油脂分离装置）被输送到排风口。



图3 侧吸下排式吸油烟机

技术指标 吸油烟机的技术指标包括风量、噪声、油脂分离度、气味降低度等。

风量 单位时间内被吸入油烟输送通道中的油烟的量。吸油烟机的标称风量多为15～18m^3。

噪声 吸油烟机的噪声水平通常为60～70dB（A）。

油脂分离度 对油烟中的油脂的分离或过滤能力，吸油烟机的优质分离度通常不低于80%。

气味降低度　净化厨房空气的能力，吸油烟机的气味降低度通常不低于90%。

xiwanji

洗碗机　(dishwasher)　利用电力驱动，依靠化学、机械和热能对碗、碟、玻璃器皿、刀叉、筷子等餐具进行洗涤、漂洗、干燥、除菌的厨房家用电器。家用洗碗机按工作原理分为叶轮式和喷射式，喷射式较为流行；按餐具装入方式分为前装式和顶装式，以前装式居多，如图1所示。



图1　洗碗机

结构和工作原理　家用洗碗机主要由内外箱体、餐具搁架、喷射或叶轮机构、电动机、供排水系统、洗涤剂投入机构、程序控制机构和加热元件等组成。

叶轮式洗碗机具有一个特殊形状的叶轮，叶轮由电动机带动快速旋转，将水向机内各方向甩出，遂产生洗涤作用。

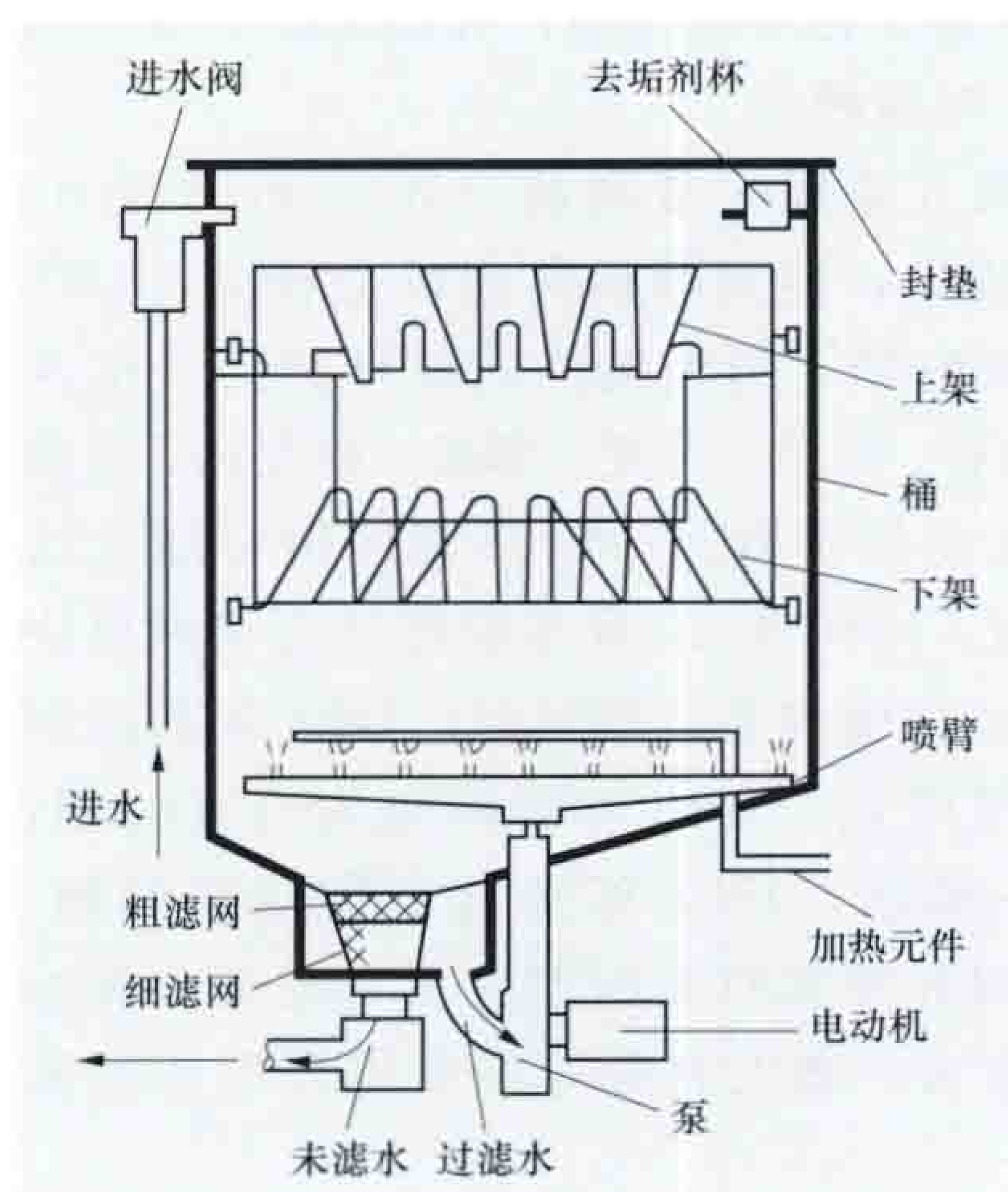


图2　喷射式洗碗机结构示意图

喷射式洗碗机（见图2）与叶轮式洗碗机的主要区别是用喷嘴代替了叶轮，工作时，先将洗涤用水经加热元件加热，然后由泵将热水送进喷臂，从喷臂上的喷嘴喷出，由于水的喷射方向与喷臂倾斜成一角度，因此水喷射时的反作用力驱动喷臂快速旋转，使水不停地改变喷射方向，喷射到机内的各个角落。洗涤后的热水经过滤网过滤，可循环使用。在洗涤程序之后，一般是两次漂洗，最后烘干。加热元件是金属管式，控制程序由程序控制器操作。

使用注意事项　为提高洗净效果，对洗涤用水的硬度和杂质含量有一定的要求。由于各地的水质不同，对洗涤剂的要求也不相同，对不同的洗涤剂最好先经试用，以决定哪一种对本地的水质最为适用。用于洗碗机的洗涤剂均为低泡沫高碱性，因此不能用于手工洗涤。为了降低能耗，如不急于立刻取出使用，可采用自然通风干燥的办法。对不适宜用洗碗机洗涤的器皿应改用手洗，如阳极氧化着色处理的铝质器皿和手绘瓷器等，易受洗涤剂影响。

沿革与发展　1927年，世界上第一台由电动机直接驱动的洗碗机在美国问世。早期的洗碗机靠人工注水，利用搅拌叶片来搅起洗槽中的水进行洗涤。30年代，洗碗机已能自动地完成预洗、洗涤和漂洗，但餐具只能自行滴干。1940年，美国研制成功第一台电热烘干的全自动洗碗机。后来美国通用电气公司制出的喷射式机型，为现代喷射式洗碗机奠定了基础。

家用洗碗机正向着省电、省水、除菌、省洗涤剂、多功能、自动化和小型化的方向发展。

xiyiji

洗衣机　(washing machine; washer)　利用电能产生的机械作用洗涤衣物的家用电器。洗衣机包括洗涤、漂洗和脱水三大主要功能，高端的洗衣干衣一体机（也叫洗干一体机）还包括烘干功能，可自动完成从洗涤、漂洗、脱水到烘干的全过程。

结构和分类　家用洗衣机主要由箱体、波轮或搅拌叶、洗涤脱水桶（筒）、传动和控制系统等部分组成。滚筒洗衣机和洗衣干衣一体机中还带有加热装置。

按洗涤方式分类，洗衣机主要有搅拌式洗衣机、滚筒式洗衣机、波轮式洗衣机（见图1）、双驱动洗衣机。其中滚筒式洗衣机按开门方式可分为前开式、顶开式、斜开式3类。

按自动化程度分类，洗衣机主要有普通型、半自动型、全自动型3种。①普通型，各功能的转换操作均需手工完成；②半自动型，能自动完成部分功能的转换操作；③全自动型，各种功能的转换操作能自动进行。



图1　波轮式洗衣机

洗衣干衣一体机中的烘干方式有直排式和冷凝式。①直排式，干衣机带有引入新鲜空气入口，烘干织物后通过出口将潮湿空气排到房间或室外；②冷凝式，通过冷凝空气去除水分完成干衣过程。

主要质量指标　反映洗衣机洗衣质量的主要指标包括额定洗涤容量、洗净比、洗净均匀度、含水率、用水量、噪声、无故障运行时间等。

额定洗涤容量表明了洗衣机一次能够洗涤的干衣的质量。一般家用洗衣机的额定洗涤容量在5～6kg，也有8～10kg的大容量洗衣机。

洗净比反映了洗衣机洗涤衣物的干净程度，是用被测洗衣机与标准洗衣机的洗涤干净程度相比得来的数值，洗净比越高，表明洗衣机洗涤衣物的干净程度越高。GB/T 4288—2008《家用和类似用途电动洗衣机》规定，洗衣机的洗净比不应小于0.70。

洗净均匀度是反映洗衣机对衣物各处污物能否全部洗干净的指标。洗净均匀度越高，表明洗涤的衣物上越不容易留下污物“死角”。国家标准规定的洗净均匀度，波轮式洗衣机应不小于86.0%，滚筒式洗衣机不应小于92.0%，搅拌式洗衣机不应小于94.0%。

含水率可反映洗衣机将衣物脱水后，衣物中含有的水量。含水率越低，表明洗衣机的脱水效果越好。国家标准规定，洗衣机脱水后衣物的含水率不应超过115%。

用水量可反映洗衣机节水能力。在洗涤同样多衣物、达到同样洗净比和洗净均匀度的情况下，用水量越少表明节水能力越高。国家标准规定的用水量，波轮式和搅拌式

洗衣机不应超过 36L/kg，滚筒洗衣机不应超过 20L/kg。

国家标准规定，洗衣机洗涤和脱水时的声功率级噪声均不应超过72dB（A）。

无故障运行时间可反映洗衣机使用的耐久性和可靠性。无故障运行时间的指标越高，表明洗衣机越经久耐用。国家标准规定的无故障运行时间为全自动波轮式和搅拌式洗衣机应达到 2000 次，滚筒式洗衣机应达到 2300h。

洗衣干衣一体机的主要指标还包括耗电量、干燥均匀度等。耗电量反映了在烘干功能下消耗的电能量。国家标准规定的耗电量，直排式洗衣机不应大于 0.83kW·h/kg，冷凝式洗衣机不应大于 0.91kW·h/kg。干燥均匀度反映了烘干功能对衣物的烘干程度。国家标准规定的干燥均匀度，直排式洗衣机不应大于 3.9%，冷凝式洗衣机不应大于 4.8%。

选购和保养　中国市场上洗衣机主要有波轮式和滚筒式两种。波轮式有双桶普通型与半自动型、套桶半自动型和全自动型多种。滚筒式为带加热装置的全自动型。3～4 人的家庭可选用 4～5kg 的洗衣机，如居住条件较为宽敞选用 6kg 及以上的较为合适。波轮式洗衣机为冷水型洗衣机，省时、省力、省电，价格低，操作简单，其缺点是耗水、衣物易缠绕，洗涤均匀性不佳，适用于棉织物、化纤织物。滚筒式洗衣机为热水型洗衣机，省水，洗净度高，洗涤均匀性较好，但耗时、耗电、价格高，适用于丝绸、毛料类织物。用户可根据家庭需要选择合适的洗衣机。选购洗衣机时，应看外壳是否光洁、有无损伤，排水管、电源线是否完好、安装牢固。除外观检查外，最好通电试运转，检查定时器、开关等控制部件操控是否灵活可靠，整机噪声小和整机运转应无严重振动。

洗衣机需用水、用电，且常在潮湿环境中工作，注意安全用电十分重要，故要求插座有可靠接地。洗衣机用完后，要排净污水，用清水清洗，然后用软干布擦干内外，定期除去积存的残屑杂物，经通风干燥，不要用塑料袋罩盖。洗衣时衣物不要过量。清理排水管时，勿用坚硬器具。在无水情况下，不要长时间运转，防止轴封过热而烧坏。洗衣机不要靠近高温、火焰放置，也不要在烈日下放置，以防止塑料件加速老化或电动机散热不良，冬季不要放在温度过低的地方。

沿革与发展　1858 年，美国人汉密尔顿·史密斯（Hamilton Smith）在匹茨堡发明了世界上第一台洗衣机。1910 年，美国人 A.J. 费希尔（A.J. Fisher）在芝加哥试制成功世界上第一台电动洗衣机。1922 年，第一台搅拌式洗衣机在美国诞生。1932 年美国出现第一台前装式滚筒洗衣机，洗涤、漂洗、脱水在同一个滚筒内完成。第一台自动洗衣机于 1937 年问世。1955 年，日本研制出波轮式洗衣机。20 世纪 60 年代的日本出现了带干桶的双桶洗衣机，人们称之为半自动型洗衣机。70 年代波轮式套桶全自动洗衣机诞生。为了达到更好的省水效果，还出现了倾斜滚筒的洗衣机。图 2 为滚筒式洗衣机。

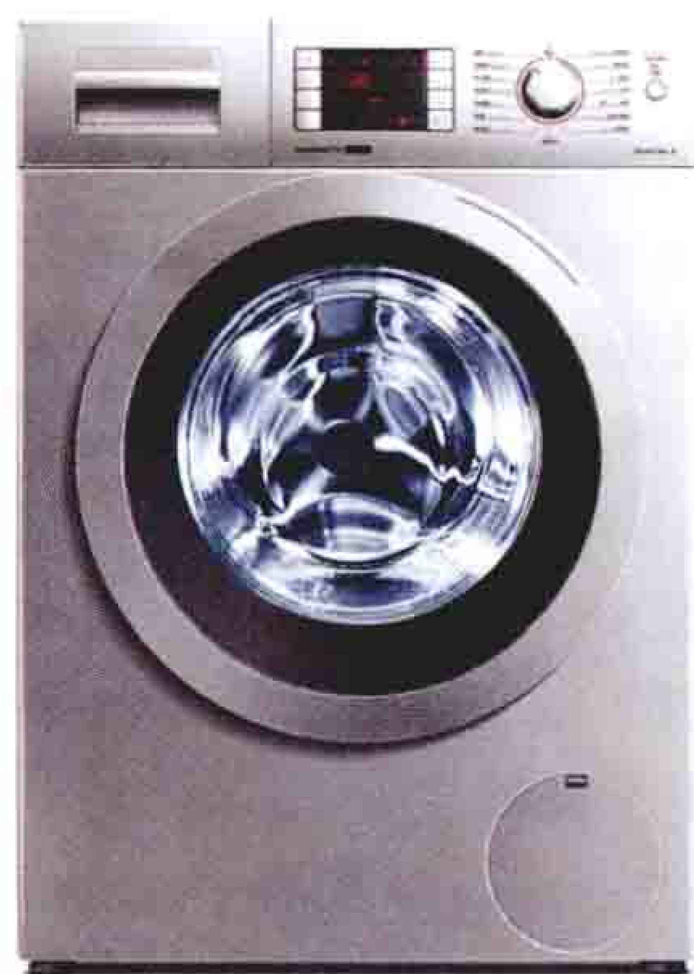


图 2　滚筒式洗衣机

中国洗衣机制造业是在制造涡卷式洗衣机的基础上发展起来的。1957 年沈阳轻工机械厂试制出中国第一台家用洗衣机，但未投产；1964 年上海试制成功涡卷式双桶洗衣机并有少量生产；1978 年广州家用电器八厂试制成功全塑喷流式 1.2kg 洗涤容量洗衣机；1978 年底无锡洗衣机厂制成全自动型涡卷式 2kg 洗涤容量洗衣机。20 世纪 90 年代中国已能生产各种类型和模糊控制的洗衣机。

xiashizhi

夏时制　（summer time）　根据夏季日照时长人为设置的一种时间制度，又称经济时。它是充分利用夏季日光照明的一项节约照明用电的措施，具体方法是在夏时制的开始日将时钟拨快 1h，到夏时制结束日再将时钟拨慢 1h，恢复至正常时间状态。夏时制及其开始与结束的日期，通常以国家法令的形式公布实行。考虑到人们对时差适应的需要，夏时制开始与结束的日期一般都选在星期日，且视各国所处的地理经纬度的不同有所差异。在北半球国家，通常选择在每年 3 月底至 4 月中旬的某个星期日作为夏时制开始日期，9 月中旬至 10 月上旬的某个星期日作为夏时制结束日期。具体拨时钟的时刻各国的做法也不尽相同，有的选在午夜 1 时拨钟，有的选在午夜 2 时拨钟。

夏时制最先由英国人威廉·威利特（William Willett）1908 年在英国议会上提出，但当时被英国议会否决。1916 年 3 月德国率先实行夏时制，当年就节约燃料费约 2 亿马克。随后，法国、奥地利、荷兰、丹麦、挪威、意大利、葡萄牙、瑞典等欧洲国家也先后实行。1966 年美国国会通过法令，也开始实行夏时制。1980 年 10 月苏联部长会议做出决定，从 1981 年起在全苏联境内实行夏时制。1981 年起欧洲共同体各国共同实行夏时制。1948 年韩国也实行夏时制，但到 1961 年取消这一做法，1987 年又重新恢复夏时制。1983 年蒙古人民共和国开始实行夏时制。罗马尼亚、保加利亚、匈牙利以及加拿大、澳大利亚等国家也先后实行夏时制。

中国在 1949 年以前，曾在上海、重庆等局部地区试行过“日光节约时间”。1986 年经国务院决定，从当年 5 月 4 日起在全国实行夏时制，5 月 4 日 2 时将时钟从 2 时拨至 3 时，到 9 月 14 日 2 时，再将时钟从 2 时拨回到 1 时，夏时制结束，共实行 133 天。1987 年中国又规定每年从 4 月中旬第一个星期日作为全国夏时制开始日期，9 月中旬第一个星期日作为夏时制结束日期。由于中国地域辽阔，跨越 5 个时区，南北纬度相差很大，全国实行夏时制，给铁路、气象部门带来不便，一些省区也自行更改夏时制的作息时间。因此，中国政府又做出规定，从 1990 年起停止实行夏时制。

夏时制的节电效果因供电状况、地理经纬度、气候、作息制度、交通和居住条件等因素的不同，存在明显的差异。据英国 1970 年调查，当年实行夏时制而节约燃料费 1 亿多英镑；法国在 1981 年调查，实行夏时制使当年节约的能源可供 100 万人口的城市使用 1 年；苏联 1981 年实行夏时制，82% 居民户的用电量减少，共节约电能 25 亿 kW·h；中国实行夏时制的抽样调查，城市居民每户平均节约电能 6.2kW·h，农村居民每户平均节约电能 1.72kW·h，机关、院校、部队、商店等节约照明用电 5%，全国共节约电能 6.27 亿 kW·h。

xiandeng

氙灯 (xenon lamp) 利用高压或超高压氙气的放电而发光的放电光源。氙灯（见图）是在高压汞灯的基础上发展起来的。它的历史与发展过程和金属卤化物灯相似。不同的是金属卤化物灯是利用高压金属蒸气放电而发光，氙灯则是利用高压或超高压的氙气放电而发光。

工作原理 氙气在高气压或超高气压情况下放电，在可见光区域内发射出近似连续的光谱。它的光色与日光很接近，而且当电流、氙气气压在很大范围内变动时，光谱能量分布的变化很小。它的发光效率为20～50lm/W，灯一点燃后就可达到稳定的光输出，灯熄灭后可瞬时再点燃。因此尽管灯的光效不是很高，但仍成为用途较广的高亮度光源。



氙灯

分类与应用 按供电电源分类有直流供电氙灯和交流供电氙灯；按电弧长度分类有短弧氙灯和长弧氙灯。除此之外，还有氙气闪光灯和脉冲氙灯。

短弧氙灯由石英玻璃泡壳、钨阳极、铈钨阴极、钼箔与灯头五部分组成。灯的电弧长度短的只有几毫米，电弧为电极稳定型，位于近似球形石英玻璃泡壳的中心部位。由于灯的电弧短，所以要求供电电压低、电流大。此外，当提高灯内充气压力时，由于功率负载较高而引起灯电压的增大，光效上升，特别是电弧亮度的提高，成为灯的一个重要优点。这种灯在工业生产、国防和科研等许多方面得到广泛的应用。

长弧氙灯的设计比短弧氙灯简单。它由石英玻璃放电管、电极、玻璃水冷套、进水与出水管等部分组成。电源可使用交流供电。长弧氙灯的功率很大，一般都在1kW以上，多数为20kW，最高可达300kW，而且光谱与日光相近，光源的亮度很高，被称为人造小太阳。长弧氙灯可作为布匹颜色检验，织物、药物、塑料、橡胶等的老化试验，人工气候室的植物培养，以及光化学反应等方面的照明光源。

氙气闪光灯大体上和长弧氙灯相似，只是利用短暂（几毫秒以下）的放电发光。脉冲氙灯在工作时的平均功率消耗较高，能在正常的交流电源的半周期内产生闪光。

xianse zhishu

显色指数 (colour rendering index) 度量光源显现物体颜色特性的参数。它表示被测光源下物体的颜色和参照光源下物体颜色的相符程度，用符号 R 表示。1974年国际照明委员会（CIE）制定一种以显色指数量值表示光源显色性的方法，规定用普朗克辐射体或标准照明体D分别作为相关色温在5000K以下或高于5000K的待测光源的参照光源，并将参照光源的显色指数定为100。这个方法同时规定若干测验用的颜色样品，以这些样品和另一3000K标准荧光灯下的颜色变化量为尺度，约定标准荧光灯的显色指数为50。根据在参照光源下和待测光源下颜色样品的色差，确定显色指数。

显色指数分为特殊显色指数和一般显色指数。

特殊显色指数 光源对某一选定标准颜色样品的显色指数，符号为 R_i，即

$$R_i = 100 - 4.6\,\Delta E$$

式中 ΔE 为所选颜色样品在参照光源下和在待测光源下的色差。CIE规定了计算一般显色指数用的8种标准颜色样品。另外，还补充规定了6种计算特殊颜色显色指数的标准颜色样品，供检验光源的某种特殊显色性能选用。它们是彩度较高的红、黄、绿、蓝及叶绿色和欧美人的肤色。中国计算光源显色指数的方法还增加了中国青年妇女肤色的颜色样品。

一般显色指数 光源对CIE规定的8种颜色样品的特殊显色指数的平均值，符号为 R_a，即

$$R_a = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{8} R_i$$

式中 R_i 为每一种颜色样品的特殊显色指数。这些颜色样品包括孟塞尔颜色系统中各种有代表性的色调，具有中等的彩度和明度。因此，通常用一般显色指数作为评定光源显色性的定量指标。

CIE按照光源的一般显色指数，将显色性能分为优（R_a=100～80）、良（R_a=79～60）、中（R_a=59～40）、差（R_a=39～20）四组。GB 50034—2004《建筑照明设计标准》规定：长期工作或停留的房间或场所，照明光源的显色指数（R_a）不应小于80；在灯具安装高度大于8m的工业建筑场所，R_a 可低于80，但必须能够辨别安全色；无电视转播的体育建筑照明光源的显色指数（R_a）不应小于65；有电视转播的体育建筑照明光源的显色指数（R_a）不应小于80；高清晰度电视转播的体育建筑照明光源的显色指数（R_a）不应小于90。

xiandian

限电 (restriction of load demand) 在特定时段有意抑制某些用户的部分或全部用电需求的行为。由于电力的生产、供应、使用必须同时完成，当发生电力系统发电装机容量不足、火力发电厂燃料供应短缺、水力发电厂来水偏枯、输变电能力不足或电力系统发生故障等情况时，为保证国民经济重要部门和社会生活必需的用电，需要对一些次要的用电需求进行限制，以保障电力系统安全稳定运行和维持合格的供电质量。通常的限电行为是由政府通过行政命令发布或经政府批准进行。

中国从1970年起开始实行计划用电。1978年实行电力定量供应，至1998年9月停止执行购买用电权、控制非生产用电、超计划（指标）用电加价收费等政策，放开了用电限制。之后，逐步通过行政措施、经济手段、技术方法等开展有序用电管理工作，规范限电行为，要求做到限电不拉路，尽量满足各类用户的用电需求。

限电一般分为计划限电和应急限电两种情况。

计划限电 预计电力供应难以满足用户的需求时，按预先批准的计划进行的限制用电行为。计划限电是由政府发布行政命令，规定某类用户的用电时间，限制某类用电量的增加，限制使用某类用电器具，对某些用户实行轮流供电等方式而实施的一种宏观调控电力需求的手段。计划限电需按预

先安排的预案进行并提前告知用户，一般不会引起用户的直接经济损失。中国的计划限电已被有序用电措施涵盖，其限电概念一般仅指应急限电。

应急限电　当电力系统发生事故或不可抗力等紧急情况时，按预先批准的方案进行的限制用电行为。当电力供应突然出现缺口时，要求迅速施行应急限电，并尽可能将其造成的影响控制在最低限度内。为应对可能出现的各种情况，事前根据用户用电的重要程度和它在国民经济中的地位，编制应急限电方案，安排应急限电序位，使电力系统在发生电力供应缺口后能迅速恢复电力平衡。中国普遍采用电力负荷管理系统等自动化装置实施应急限电。尽管应急限电有事先准备的周密预案，但由于应急情况的突发性，不可避免会造成用户一定的经济损失。

xiangshi biandianzhan

箱式变电站　(compact substation)　将电力变压器和高、低压配电装置等组合在一个或几个柜体内，形成可以整体吊装运输的箱式配电变电所。电压等级一般都为10/0.4kV。箱式变电站具有结构紧凑、外观整洁、移动安装方便、维护量小及节省占地等优点，加上箱体造型和颜色通常还具有美化环境的作用，在城市配电网建设中被广泛采用。



图1　欧式箱变

中国使用的箱式变电站可分为习惯俗称的欧式箱变和美式箱变。欧式箱变在欧洲国家流行使用，国际上也称之为紧凑型变电站或预装式变电站，如图1所示；美式箱变为共箱组合式，没有单独的高、低压开关柜，在美国也称为平台式变压器，如图2所示。



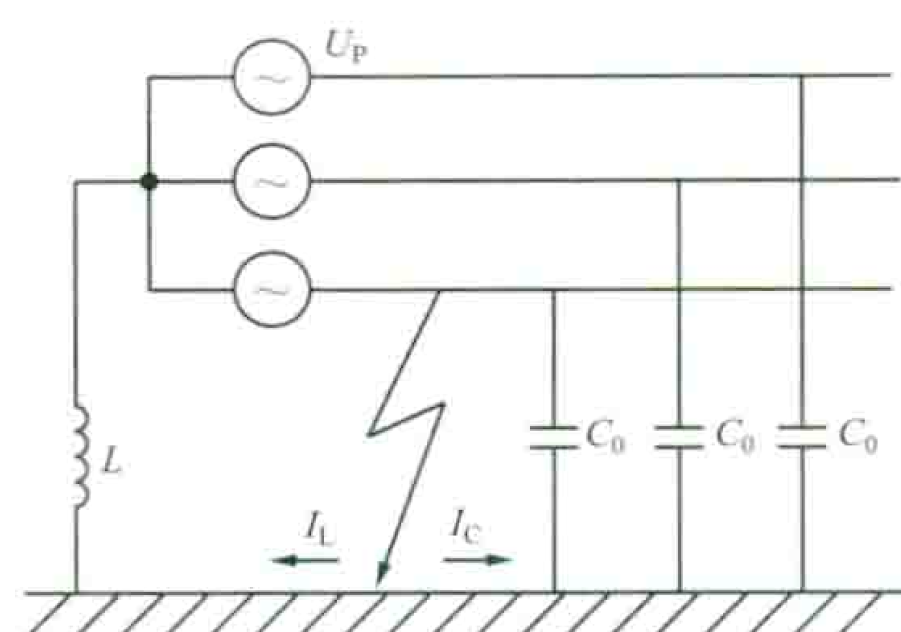
图2　美式箱变

欧式箱变中高压侧开关可按系统需要选用，有用真空断路器、各种环网开关的，也有用负荷开关加熔断器的，有的还在高压侧加装了计量柜等装置。低压侧有安装总开关及分路馈线开关的，也有只安装馈线开关的，有的还在低压侧安装电容补偿装置，向低压终端用户直接供电。配电变压器一般选用油浸式或干式变压器，变压器容量可以按需要容量配装和更换。

随着城市用地紧张的矛盾日益突显，全地埋式与半地埋式将是箱式变电站的发展方向之一。未来的箱式变电站不仅要求安全可靠，具有遥测、遥信、遥控、遥调的“四遥”功能，而且必须具有能完成故障区段自动定位、故障切除、负载转供及网络重构等一系列智能化功能，换言之，智能化箱式变电站是箱式变电站的发展方向。

xiaohu xianquan zhuangzhi

消弧线圈装置　(arc-suppression coil)　接在配电系统的中性点与地之间的单相电抗器，又称消弧电抗器。应用消弧线圈补偿配电网单相接地故障时的对地电容工频电流，能有效地自动消除大部分单相瞬时接地故障，大幅度减少跳闸率和设备损坏率，明显提高供电可靠性。



消弧线圈接地系统单相接地原理示意图

基本原理　消弧线圈一般设有抽头以调节电感量，铁芯设有气隙以保证电感值之线性。配电系统正常运行时，系统中性点电位为零，没有电流流过消弧线圈。如图所示，当系统发生单相接地故障时，若不接消弧线圈，则流经故障点的电流 I_C 为

$$I_C=3\omega C_0U_P$$

式中 ω 为工频电源的角频率；C_0 为线路每相对地电容；U_P 为系统运行相电压。

接入消弧线圈后，则有感性补偿电流 I_L 通过接地故障点，I_L 为

$$I_L=\frac{U_P}{\omega L}$$

式中 L 为消弧线圈的电感。

此时，流过接地点的电流是 I_C 和 I_L 之差 I_r，有

$$I_r=I_C-I_L=U_P\left(3\omega C_0-\frac{1}{\omega L}\right)$$

I_r 称为残流。调节消弧线圈的电感 L，使 $\frac{1}{\omega L}=3\omega C_0$，即 $I_L=I_C$，则 $I_r=0$，这种运行状态称为消弧线圈的全补偿运行状态。相应地，当 $I_L<I_C$ 时，称为消弧线圈的欠补偿运行状态；$I_L>I_C$ 时，称为消弧线圈的过补偿运行状态。

表征消弧线圈补偿程度的物理量是消弧线圈装置的脱谐度 ν，有

$$\nu=\frac{I_r}{I_C}=1-\frac{1}{3\omega^2LC_0}$$

$\nu=0$ 为全补偿运行状态，$\nu>0$ 为欠补偿运行状态，$\nu<0$ 为过补偿运行状态。ν 的绝对值愈小，流经接地点的残流愈小，残流过零后接地点恢复电压的增长速度愈慢，这些都有利于接地电弧的熄灭。但消弧线圈装置不能运行在 $\nu=0$ 的全补偿状态，因为在正常运行时它与导线对地电容正好形成线性谐振，使系统产生线性谐振过电压。ν 值也不宜太大，实际运行时要求选取适当的 ν 值，并且通常调整在过补偿运行状态。

分类　消弧线圈装置可以按补偿电流的调节原理、装置投入及退出补偿状态的方式、一次设备绝缘介质等的不同进行分类。按消弧线圈补偿电流的调节原理不同可分为调匝式、调容式、调气隙式、直流偏磁式、磁阀式等；按装置投入及退出补偿状态的方式不同可分为预调式和随调式；按一次设备绝缘介质不同可分为油浸式和干式；按补偿电流的调节是否连续可分有级调节式和无级调节式；按消弧线圈装置的结构不同可分为组合式、一体式、分立式。

发展　最初的消弧线圈装置都是采用手动调谐方式，不能精确地跟踪电网电容电流的变化，其应用受到限制。自20世纪70年代开始，采用自动调谐方式。该方式能按电网电容的变化来自动改变消弧线圈的电感，使单相接地电容电流得到有效补偿。自动调谐式消弧线圈装置已日趋成熟，其发展趋势主要为：精确跟踪补偿技术，调谐选线及故障定位一体化技术，多台消弧线圈装置并列运行等。

xiaohu xianquan zidong tiaoxie

消弧线圈自动调谐　(automatic tuning of petersen coils)　调整消弧线圈电感参数，实现非有效接地系统单相接地故障电流跟踪补偿的控制措施。根据电网运行状态的变化，自动跟踪测量电网对地电容电流，在适当的时机将消弧线圈装置调整到合理的补偿状态。单相接地故障时，通过消弧线圈自动调谐控制可以使接地电流维持在较低水平，使接地电弧更易于熄灭，故障消失后限制电网电压恢复速度，减少电弧重燃概率。

基本要求：①消弧线圈补偿度应满足确保电网安全运行和尽量减少接地故障点残余电流等要求。②跟踪测量和调谐速度快，当电网运行状态改变后，能在最短时间内完成电容电流跟踪测量，必要时及时调整消弧线圈装置到合理的补偿状态。③灵敏度高，对电网状态的少量改变，也能及时做出反应。④动作可靠，调整动作简捷准确，避免频繁反复调整。

消弧线圈补偿度　接地时，消弧线圈补偿的工频电感电流与电网对地工频电容电流幅值之比。根据补偿度大于1、等于1和小于1（即电感电流幅值分别大于、等于和小于电容电流），消弧线圈可分为过补偿、全补偿和欠补偿三个状态。

消弧线圈补偿度的选择：根据电网对地分布电容的工频电流大小，合理确定消弧线圈的补偿容量，即确定消弧线圈的合理补偿度或合理补偿状态。综合补偿效果和电网安全两个因素，消弧线圈的合理补偿状态应为适度过补偿。补偿度一般在105%～120%范围内选择，并使接地点残余电流小于5A，保证电弧能可靠熄灭。

消弧线圈处于全补偿状态时，补偿效果最好，此时故障点残余电流最小。故障电弧能否自动熄灭与故障点电流大小有关，电流越小，在电流过零时电弧越容易自动熄灭。故障点电弧熄灭后会不会再次击穿也与故障点电流大小有关，电弧熄灭后故障相电压和故障点绝缘的恢复存在一个竞争关系，故障点电流越小，则熄弧后电压恢复速度越慢，给故障点绝缘恢复提供更充足的时间，从而可以避免绝缘再次击穿。当消弧线圈处于全补偿状态时，其工频电感电流和系统对地工频电容电流大小相等、方向相反，故障点只残余工频有功和谐波电流分量，故障点残余电流最小，最容易使电弧自熄灭，且可最大限度地避免电弧重燃。

消弧线圈处于过补偿状态时，对电网运行安全最有利。在全补偿时，消弧线圈感抗等于系统对地电容容抗，正常工作时容易引起串联谐振，使中性点位移电压过度升高，可能造成设备绝缘损坏。从安全角度出发，消弧线圈应偏离谐振点运行。

欠补偿方式在电网改变运行状态切除部分线路后，容易形成全补偿，不宜使用。

电网对地电容电流的跟踪测量　根据电网运行状态的变化，及时自动跟踪测量电网对地分布电容的工频电流大小，是实现消弧线圈装置自动调谐的基础。其测量方法主要有调谐测算法、注入信号法和相位调谐法等。

调谐测算法　在电网正常运行状态下，改变消弧线圈的电感值，利用中性点位移电压和消弧线圈电流计算电网对地电容电流。调谐测算法又可分为中性点位移电压曲线法和最大位移电压法。①中性点位移电压曲线法。在电网正常运行状态下，分别测量消弧线圈电感值改变前后的中性点位移电压和消弧线圈电流，计算系统三相对地电容值以及电网对地电容电流。②最大位移电压法。通过调整消弧线圈电感值，使中性点位移电压达到最大，此时消弧线圈感抗等于系统对地电容容抗，可推算出电网对地电容电流。

注入信号法　利用消弧线圈装置的电压测量线圈，向电网注入一个频率连续可变的信号，寻找消弧线圈电感和电网对地电容的谐振频率，再推算出工频下电网对地电容电流。

相位调谐法　在电网的某一相附加一个对地的小电容，测量电网中性点电压和附加电容电压之间的相位关系，由此推算电网对地电容电流。

消弧线圈自动调谐方法　按照消弧线圈自动调谐的时机，可分为预调谐和随调谐两种方法，还可利用多台消弧线圈自动调谐。

预调谐方法　在接地故障发生前，预先调整消弧线圈装置到合理补偿度。在电网正常运行时，根据电网状态变化及时测量系统对地电容电流，将消弧线圈装置调整到合理补偿度。为了防止消弧线圈电感和系统对地电容间产生谐振引起中性点位移电压过度升高，需要在消弧线圈上并联或串联一定数值的阻尼电阻。接地故障后，消弧线圈能立即起到补偿作用，但阻尼电阻需要尽快切除以防止其过热损坏。对于机械式消弧线圈装置，为安全起见故障期间一般不再调整补偿容量；故障消失后，消弧线圈再接入阻尼电阻。预调谐方法主要适用于调谐速度较慢的机械式消弧线圈装置。

随调谐方法　在接地故障发生前消弧线圈以较小补偿度运行，而在接地后以最快速度调整到合理的补偿度。在电网正常运行时，根据电网状态变化及时测量电网对地电容电流，但并不调整消弧线圈装置到应有的补偿状态，而是让其以较小补偿度运行，此时电网接近于不接地方式。在接地故障发生后，以最快速度将消弧线圈调整到合理补偿度，此时电网为经消弧线圈接地方式。接地故障消失后，再调节消弧线圈装置远离应有的补偿状态。由于在电网正常运行时消弧线圈装置远离与电网对地分布电容间的谐振点运行，可以避免串联谐振的发生，不需要设置阻尼电阻。随调谐方法适用于调谐控制速度较快的电子式消弧线圈。

多台消弧线圈的自动调谐　当多台消弧线圈装置并联运行于同一电网时，一般情况下只保留一台装置为自动调谐方式，而其他消弧线圈装置应为固定补偿方式。

消弧线圈参数调整方式　根据消弧线圈补偿容量是否可连续调整，消弧线圈电感参数可分为有级调整和无级调整。

有级调整　在消弧线圈调谐过程中，其电感参数和补偿

容量为不连续阶梯式变化的调谐方法，适用于多级有载抽头式等类型消弧线圈，其补偿容量一般在产品产生时就已确定，分为几个到十几个等级。当电网电容电流变化时，消弧线圈装置只能在两个相邻的补偿容量之间做出选择，其补偿度是不确定的，随电网电容电流在一定范围内变化。

无级调整　在消弧线圈调谐过程中，其电感参数和补偿容量为连续变化的调谐方法，适用于电子式消弧线圈。利用电力电子器件（如晶闸管）连续可控的特点实现消弧线圈装置补偿容量的连续调节，当电网电容电流变化时，消弧线圈装置可按照预设的补偿度对工频电流进行较为精确的补偿，但其一般会产生一定量的谐波干扰电流注入故障点。

展望　现有消弧线圈装置只能输出无功电流，已有的调谐策略一般采用过补偿方式，故障点仍然留有少量的工频无功电流，再考虑到故障电流中的有功和谐波分量，故障点残余电流仍然较大，其在促进电弧自熄灭和抑制故障后电压恢复过程的作用仍然有待进一步提高。接地补偿调谐装置的发展方向是采用基于电力电子器件的有源电流发生装置，接地故障后向系统注入包括工频无功分量、有功分量以及谐波分量的宽频段电流，实现故障点接地电流完全补偿，可以最大限度减少故障点残余电流（使之趋于0），使故障电弧更容易自熄灭；灵活控制熄弧后系统电压的恢复速度，给故障点绝缘提供更充足的恢复时间，最大限度地避免电弧重燃。

xiaoxing duanluqi

小型断路器　（miniature circuit breaker）　用于家用或类似场所的电气线路和设备的过载和短路保护，也可作为电缆和电动机的保护，或在正常情况下作为对线路的不频繁操作转换的低压电器，又称微型断路器。小型断路器的外壳是由模压绝缘材料制成的，其交流额定频率为50Hz或60Hz、交流额定电压不超过440V，或直流额定电压不超过440V，额定电流不超过125A，并可与剩余电流动作单元拼装成剩余电流动作断路器。小型断路器的特点是尺寸模数化和安装轨道化，通常为单极结构，可由几个单极断路器拼装成多极的，以适应三相电路使用。带短路延时分断功能和带电动操作功能的小型断路器可以满足终端配电回路的选择性保护和终端配电系统网络化要求。各类小型断路器如图1所示。



图1　小型断路器

小型断路器的脱扣器采用热-磁式。热脱扣器由双金属片、热元件和执行元件组成，6A以下的小型断路器多采用复式加热方式。磁脱扣器作短路瞬时保护，当短路电流通过螺管式冲击电磁铁的线圈时，其动铁芯一端直接顶开动触头，另一端推动脱扣钩使机构脱扣。小型断路器的典型结构如图2所示。

根据瞬时脱扣电流的不同分为B型、C型、D型。B型小型断路器的瞬时脱扣电流为3～5倍额定电流，适用于住户配电系统、家用电器的保护和人身安全保护；C型小型断路器的瞬时脱扣电流为5～10倍额定电流，适用于保护配电线路以及具有较高接通电流的照明线路和起动电流较小的电动机回路；D型小型断路器的瞬时脱扣电流为10～20倍额定电流，根据需要可以扩展至50倍额定电流，适用于保护具有很高冲击电流的设备，如起动电流较大的电动机、变压器、电磁阀等。常见的是C型小型断路器。

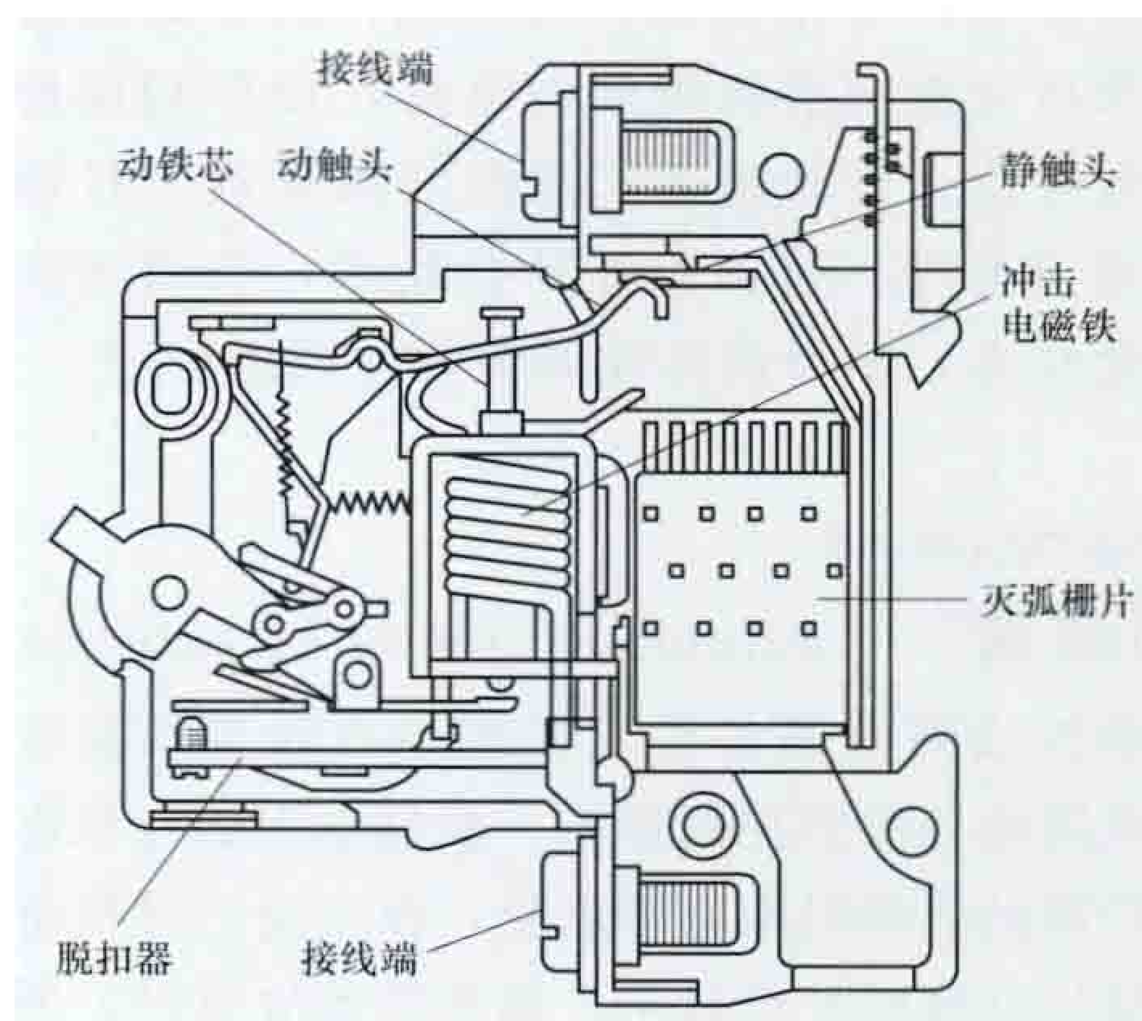


图2　小型断路器的结构示意图

xiebo

谐波　（harmonic）　一个周期电气量的正弦波分量，其频率为基波频率的整数倍，又称高次谐波。电力系统谐波最主要的来源是各种非线性用电负荷。接入电力系统并向电力系统输入2倍于50Hz及以上频率电流的设备，如电力变压器、电容器，旋转电机，采用硅或晶闸管的整流、逆变、变频装置，电弧炉，电焊机，镇流器，电力机车，调压调速装置，以及电视机、电冰箱、空调、微波炉、电子节能灯等，都是谐波源。为了表示畸变波形偏离正弦波形的程度，最常用的特征量有谐波含量、总畸变率和谐波含有率。谐波电压含量为

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty}(U_h)^2}$$

谐波电压总畸变率为

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\%$$

第 h 次谐波电压含有率为

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\%$$

式中 h 为谐波次数，$h=1$，2，3，…（$h=1$ 时为基波）；U_h 为第 h 次谐波电压有效值（均方根值）；U_1 为基波电压有效值（均方根值）。

谐波电流含量为

$$I_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty}(I_h)^2}$$

谐波电流总畸变率为

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\%$$

第 h 次谐波电流含有率为

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\%$$

式中 h 为谐波次数，$h=1$，2，3，…（$h=1$ 时为基波）；I_h 为第 h 次谐波电流有效值（均方根值）；I_1 为基波电流有效值（均方根值）。

影响　谐波会对电力系统或并联的负载产生危害。

（1）对电网的影响。①发生谐振现象。当系统含有高次谐波时，会增大电网发生谐振的可能性，诱发过电压或过电流，导致设备损坏。②导致继电保护误动。在谐波作用下，继电保护、自动装置和计算机不能正常工作，引起装置误动或设备损坏。③增加电网损耗。谐波在电力系统和用户电气设备上会产生附加损耗。如果高次谐波含有率为30%，则线路损耗就会增加9%。④导致电气设备损坏。在谐波作用下，发电机、变压器、电缆和输电线路、大型换流装置、并联电容器组等都会不同程度地发生过热、噪声、机械振动、过电压等现象，加速绝缘老化或击穿。

（2）对用电设备的影响。①引起电动机的附加损耗，产生机械振动、噪声和谐波过电压。②导致变流装置非正常工作。电压畸变会影响换流器和换流器负荷的运行，使受控整流器的控制逻辑错乱。③缩短灯泡的寿命，普通的白炽灯，在频率为5～20Hz的谐波作用下会产生闪烁，引起人的视感不适（即闪变）。④引起电视机图像畸变，画面及亮度变化，甚至出现图像翻滚。⑤计算机正常工作程序遭到破坏，对数据的传输和处理带来严重影响。

（3）对通信线路的干扰。谐波通过电磁感应对电视广播和通信产生干扰。100Hz以上的谐波导致电话回路信号的误动；2000～5000Hz的谐波引起通信噪声。

（4）对测量仪表及电能计量的影响。增大测量仪表误差，使电能计量失准。谐波频率特性还会影响电压和电流互感器的测量结果。

标准　20世纪60年代以来，电力半导体技术迅速发展，使得接入电力系统中的谐波源大量增加，供电电压波形畸变日趋严重，电网谐波污染对电力系统和用电设备产生了严重危害和影响，世界各国开始投入大量人力进行谐波问题的研究和治理。英国、美国、日本、法国、德国、瑞士、澳大利亚、芬兰等国家和一些国际组织先后制定了谐波电压、电流标准。

在中国，GB/T 14549《电能质量　公用电网谐波》，规定了标准电压110kV及以下的公用电网谐波电压限值（见表1），以及公共连接点的用户向电网注入的谐波电流允许值（见表2）。标准电压为220kV的公用电网可参照110kV执行。

部分国家限制电力系统谐波的标准见表3，欧洲家用和低压电器谐波电压允许值见表4。

表1　公用电网谐波电压（相电压）限值

电网标称电压（kV）	电压总谐波畸变率（%）	各次谐波电压含有率（%）	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10	4.0	3.2	1.6
35	3.0	2.4	1.2
66	3.0	2.4	1.2
110	2.0	1.6	0.8

表2　注入公共连接点的谐波电流允许值

标准电压（kV）	基准短路容量（MV·A）	谐波次数及谐波电流允许值（A）																							
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	78	62	39	62	26	14	19	21	16	28	13	14	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

注：220kV基准短路容量取2000MV·A。

表3　部分国家限制电力系统谐波的标准

国家	标准编号	电力网电压（kV）	谐波次数 n	各次谐波电压含量（%）	电压波形畸变率（%）
英国	ERG5/3 1976	0.415	奇次3～19 偶次2～18	4 2	5
		6.6或11	奇次3～19 偶次2～18	3 1.75	4
		33或66	奇次3～19 偶次2～18	2 1	3
		132	奇次3～19 偶次2～18	1 0.5	1.5
瑞典	SEF 1974	0.25/0.43 3.3～24 36～72 ≥84	2～25	3 2.5 1.5 0.7	4 3 2 1

国家	标准编号	电力网电压（kV）	谐波次数 n	各次谐波电压含量（%）	电压波形畸变率（%）
美国	ANSI/IEEE Std.519—1981	0.46			特殊用户：3 公用电网：5 专供换流器：10
		2.4～6.9			公用电网：5 专供换流器：8
		≥115			1.5
澳大利亚	AS2279—1979	配电33以下	奇次 偶次	4 2	5
		输电22～66	奇次 偶次	2 1	3
		≥110	奇次 偶次	1 0.5	1.5

续表

国家	标准编号	电力网电压（kV）	谐波次数 n	各次谐波电压含量（%）	电压波形畸变率（%）
芬兰		≤1		4	5
		3～20		3	4
		30～45		2	3
		≥110		1	1.5
法国			奇次 3～∞	0.6	1.6
			偶次 2～∞	1	
德国	DIN EN—57160	≤22	5	3	
		22～66	5	2	
		66～132	5	1	
新西兰		输电≤66	奇次	4	5
			偶次	2	
		输电≥66	3	2.3	
			5	1.4	
			7	1.0	
			9	0.8	
			11	0.7	
			13	0.6	
			15	0.5	
			17～21	0.4	
			23～49	0.3	
			2	1.2	
			4	0.6	
			6	0.4	
			8～10	0.3	
			12～15	0.2	

国家	标准编号	电力网电压（kV）	谐波次数 n	各次谐波电压含量（%）	电压波形畸变率（%）
俄罗斯	Bes L 1966/116	≤1	奇次	6	5（最大 10）
			偶次	3	
		6～20	奇次	5	4（最大 8）
			偶次	2.5	
		35	奇次	4	3（最大 6）
			偶次	2	
		≥110	奇次	2	2（最大 4）
			偶次	1	
日本	电气协同研究会 1987	6.6	3～39（奇次）	1～4	5
		22～77	3～39（奇次）	0.5～2.5	3
瑞士	ASE 3600	低压	奇次	0.3～5	
			偶次	0.25～1.25	
		中压（≤36）	奇次	0.24～4	
			偶次	0.20～1.0	
加拿大	CNHS（Rec. 1986）	≤12			7
		12～44			6
		≥115			4

表 4　欧洲家用和低压电器谐波电压允许值

奇次谐波 n	最大谐波电压含量（%）	偶次谐波 n		最大谐波电压含量（%）	奇次谐波 n	最大谐波电压含量（%）	偶次谐波 n		最大谐波电压含量（%）
3	0.85	对称控制	2～40	0.20	9	0.40	不对称控制	2	0.30
5	0.65				11	0.40			
7	0.60				13	0.30		4～40	0.20
					15～39	0.25			

改善措施　消除谐波的主要措施有：①受电变压器采用 Yd 或 Dy 接线，或增加整流器相数，改为多相整流，以减少注入电压，提高供电电压等级或采用专线供电等；②采用滤波装置；③采用电容器吸收谐波电流；④调整三相负荷，使其保持三相平衡；⑤加大供电系统容量，选择合理的供电方式。一些减小谐波危害的技术措施见表 5。

表 5　减小谐波危害的技术措施

名称	内　容	评　价
增加换流装置的相数或脉动数	改造换流装置或利用相互间有一定移相角的换流变压器实现	可有效地减小谐波量；换流装置容量应等分；使装置复杂化，增加了投资
加装交流滤波装置	在谐波源附近装若干单调谐及高通滤波支路，以吸收谐波电流	可有效地减小谐波量；应同时考虑功率因数补偿和电压调整效应；装置运行维护简单，但需专门设计
改变谐波源的配置或工作方式	具有谐波互补性的装置应集中，否则应适当分散或交替使用，适当限制谐波量大的工作方式	可以减小谐波的影响；对装置的配置和工作方式有一定的要求，规划设计阶段考虑
加装静止无功补偿器（或称动态无功补偿器）	有 TCR、MCR 和 TSC（或 TSF）等类型，采用 TCR、MCR 或 TSF 静补器时其容性部分设计成滤波器	可有效地减小波动谐波源的谐波量；有抑制电压波动、闪变、三相不平衡和补偿功率因数的功能，具有综合的技术经济效益；一次投资较大，需专门设计
增加系统承受谐波能力	将谐波源由较大容量的供电点或由高一级电压的电网供电	可以减小谐波的影响；在规划和设计阶段考虑
避免电容器对谐波的放大	改变电容器的串联电抗器，或将电容器组的某些支路改为滤波器，或限定电容器组的投入容量（组数）	可以有效地减小电容器对谐波的放大作用并保证电容器组的安全运行；需专门设计

续表

名称	内　　容	评　　价
提高设备抗谐波干扰能力，改善谐波保护性能	采用K型变压器；改进布线；加粗导线；改进设备性能，对谐波敏感设备采用灵敏的谐波保护装置；降低接地电阻；采用独立回线；改进避雷器（阻容吸收装置）参数和配置等	适用于谐波引起的过载发热，特别是对暂态过程中的谐波较敏感的设备；需专门研究
采用有源滤波器等抑制谐波的措施	研制和逐步推广使用	性能好，体积小，用于低压小容量谐波源的补偿，造价较高

注：TCR—晶闸管控制电抗器；MCR—磁控电抗器；TSC（或TSF）—晶闸管投切电容器（或滤波器）。

xindianji

锌电积 (zinc electrolytic deposition)

以硫酸锌水溶液为电解液，进行电解提取锌的冶金过程，又称锌电解。锌精矿经过焙烧产出焙砂，用废电解液和各种洗液配成的含有一定量硫酸的水溶液作溶剂，从焙砂中浸出锌。净化后的浸出液用来电解提取锌。1881年，法国人L.利特伦基(L. Litrange)公布了电解提取锌的专利，百年来一直沿用这一方法。锌电解的优点为一次得到高纯度金属，溶剂可以再生循环使用。缺点为槽电压高，电流效率较低，耗电量较大。

原理　以铅银合金板为阳极（不溶阳极），铝板为阴极，含有硫酸的硫酸锌水溶液为电解液，在电解槽中通直流电电解。在阴、阳极上发生如下电化学反应



阴极　$Zn^{2+}+2e \longrightarrow Zn$　　析出金属锌



阳极　$H_2O-2e \longrightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2$

电解槽槽电压为3.4～3.6V，电流密度为300～600A/m²，每吨电解锌消耗直流电能2900～3100kW·h。电解锌的纯度可达99.99%以上。锌电解能耗较高。

电解过程中，阳极除析出氧外，还析出二氧化锰，作为氧化剂返回到浸出工序。

电解过程　锌电解的电解液系浸出净化后的含锌约150g/L的中性硫酸锌水溶液和从电解槽中排出的含锌约50g/L、硫酸约170g/L的废电解液的混合液。两者的体积比称为电解液的循环体积比。增大循环体积比中废电解液的比例，即增大循环量，可以消除浓差极化，降低槽电压，提高电流效率，但循环量过大会使阳极析出的二氧化锰进入阴极，影响阴极析出锌的质量，同时也增大了电能消耗。通常控制电解液循环体积比为1∶(10～25)。

锌电解过程中，由于电解液等的电阻产生的焦耳热超过因蒸发、辐射而散发的热量，为维持电解液的温度在35～40℃，必须对电解液进行冷却，普遍采用空气冷却塔。

为得到合格的电解锌，电解液净化程度是锌电解的关键技术，也是迄今为止一直在研究的课题。

在锌电解过程中，如中断供电将引起电解锌重新溶解，析出大量氢气，可能引起爆炸和火灾，需采取有效措施，保证正常供电。

锌电解的槽电压较高，总电压也较高。大型锌电解厂的电解槽直流电总压降可达800V，应注意漏电及人身安全。

锌电解液酸度较高，管道、管材及设备要防腐蚀；锌电解过程电解液中钙镁结晶比较严重，需定期清理。

为得到致密、平滑的阴极锌，生产中通常在电解液中加入少量添加剂，如碳酸锶、骨胶等。

电解槽槽体　由于自动剥锌机和电子计算机的应用，大型阴极自动化电解车间不断出现，如图所示。阴极面积达3.2m²，劳动力大幅减少，工人劳动强度大幅降低。与大型阴极板配套的电解槽也呈现大型化趋势，每槽可装阴极片多达120～130片。电锌厂常用钢筋混凝土电解槽，内衬环氧树脂，因其被电解液腐蚀后难以更换，施工及检修困难等问题，陆续出现了整体玻璃钢或聚丙烯塑料电解槽、呋喃树脂混凝土电解槽、乙烯基树脂混凝土电解槽等，其特点是质量轻、绝缘性好、检修方便。有关电解槽材质的研究也是业界一直关注的课题。



电解锌生产线

参考书目

梅光桂，王德润，等．湿法炼锌学．长沙：中南大学出版社，2001.

xinzhuang zengrong

新装增容 [capacitance increase (expansion)]

用户初次向供电企业提出用电需求或后续增加用电容量的业务。新装增容是电力营销中业扩报装管理的重要内容之一，新装为用户初次与供电企业建立供用电合同关系的业务，又称新装用电；增容是原有用户在供电点不变、用电地址不变、用电性质不变、用电主体不变的前提下，仅增加用电设备或者变压器容量并变更供用电合同的业务，又称增容用电。新装增容按照客户类型、电压等级、用电性质的不同，可以分为低压居民新装增容、低压非居民新装增容、高压新装增容、临时用电新装增容等类型。

用户新装或增容用电，必然引起各级电压电网供电能力的增加和相应的供电工程。用户受电电压的变电设施及以下各级电压的供电工程，均属用户内部供电工程；用户受电电压的变电设施以上（不包含变电设施）各级电压的供电工程，均属于用户外部供电工程。

办理新装增容业务时，供用电双方需根据用户的用电地点、电力用途、用电性质、用电设备清单、用电负荷、保安

电力、用电规划等方面的需求，就供电可能性、用电容量、供电条件等进行协商，建立供用电合同关系（新装用电）或者变更供用电合同的相关内容（增容用电）。

xingcheng kaiguan

行程开关 （travel switch） 反应工作机械的行程，发出命令以控制其运动方向或行程大小的主令电器，又称限位开关。通常，行程开关被用来限制机械运动的位置或行程，使运动机械按一定位置或行程自动停止、反向运动、变速运动或自动往返运动等。行程开关中都含有一个类似按钮的微动开关元件，使用时当工作机械的行程到达某一规定距离时，下压行程开关的撞头，微动开关被按下，其触头便进行分（或合）动作。行程开关广泛应用于机床、起重运输机械、冶金机械以及闸门装置等设备。如在龙门刨床中，根据加工工件的长度，通过调整安装在床身下部两端的两个行程开关的位置，即可控制龙门刨床床身往复运动的行程。又如行车时，在限位的终端设置行程开关可以防止运行事故。

行程开关按传动机构的不同分为直动式［见图1（a）、图1（b）］和转动式［见图1（c）、图1（d）］。行程开关的撞头上可装有滚轮，带滚轮的行程开关又分为自动复位式和不能自动复位式。图1（c）所示的行程开关的传动杆做成U形，两侧各装有一个滚轮，一个滚轮下压后，壳体内的微动开关被下压而动作，必须等另一个滚轮下压后，微动开关才被复位。有的行程开关的头部还能在互成90°角的四个方向上任意安装，而且可以调整控制钮的位置，以适应不同的需要，满足单向或双向动作的要求。图2所示为行程开关实物。

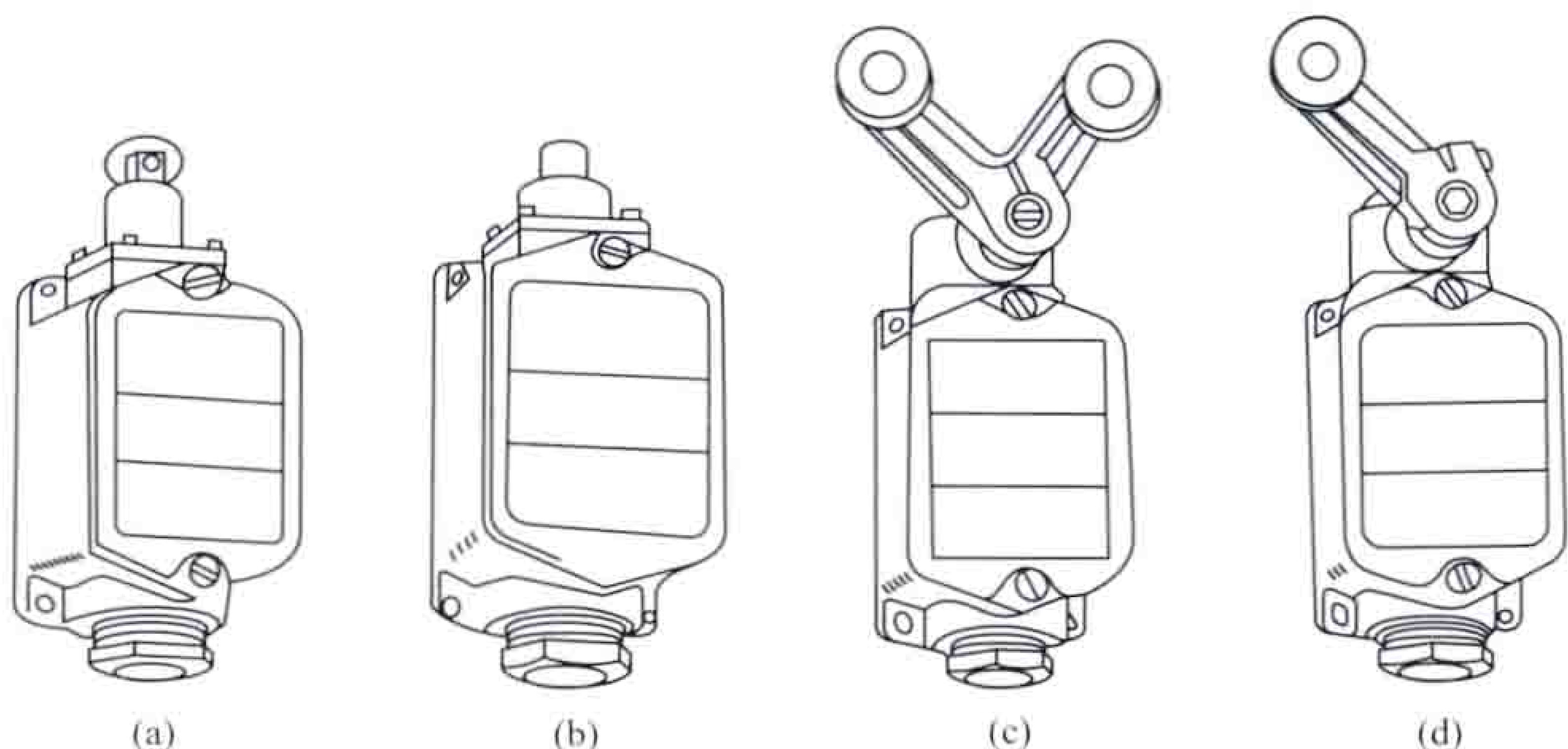


图1 行程开关结构

（a）带滚轮的直动式；（b）直动式；（c）双滚轮不能自动复位式；（d）自动复位式



图2 行程开关

xuqiuce guanli

需求侧管理 （demand side management，DSM） 采取有效的激励措施及适宜的运作方式，引导消费者改变用能方式和时间，使资源得到优化配置的活动。需求侧管理技术首先在电力、煤气、热力等公用事业中使用，在电力事业上的应用比较成熟。电力需求侧管理是指通过发电企业、电网企业、能源服务企业、社会中介组织、产品供应商、电力用户等共同协力，提高终端用电效率和改变用电方式，在满足同样用电功能的同时减少电量消耗和电力需求，以较少的新增装机容量达到系统电力供需平衡，减少一次能源的消耗与污染物的排放，在满足同样的能源服务同时，节约全社会总资源的消耗。

产生背景 需求侧管理是20世纪70年代后期在北美、欧洲等地区发达国家兴起的。1973年，第四次中东战争引发了第一次世界能源危机，石油短缺和油价暴涨，世界各国对能源问题给予了极大的关注。为应付能源短缺，度过经济危机，以及减轻化石燃料燃烧产生的CO_2、SO_2、粉尘等排放物造成的环境污染，以美国为首的西方国家不断地调整能源战略，提出了合理有效地利用能源资源，减少能源消耗的重大决策，并制定了一系列法规、标准、政策。在开发各种能源资源的同时，推动节能和环境保护，鼓励节能研究和推广高效节能产品，大力培育节能市场，以挖掘资源利用中的潜力来减少经济增长对能源资源需求增长的压力，建立适应现代社会发展的资源配置方法和管理模式。需求侧管理就是在这种背景下产生的。它从根本上改变了单纯依靠增加能源供应来满足需求增长的传统观念，建立了把节约的能源视同为供应方的一种可替代资源的新概念。

管理内容 电力需求侧管理是一项系统工程，涉及面较广，其基本内容包括资源调查、管理对象选择、管理目标设置、管理手段选择、政策与标准制定、管理计划制定、项目实施、项目后评估等。

（1）资源调查，又称潜力分析。主要通过调查需求侧电力设备的能效状况及电力用户的使用习惯，初步分析资源利用的潜力。调查工作一般采用统计与典型调查相结合，对比分析与典型测试相结合的方法。这项工作做得越深入仔细，获得的基础数据越准确可靠，需求侧管理目标实现的可能性就越大。

（2）管理对象选择。需求侧管理必须有具体明确的管理对象，以便采取有针对性的措施。一般选择高耗电、低效率、使用量大面广的用电设备为重点管理对象。

（3）管理目标设置。一般根据降低消耗、节约能源、优化资源配置的总目标，结合实际情况，分阶段分年度设置管理目标。在电力供应不足时，以节约电量为目标，在电力供需平衡紧张时，以提高负荷率为目标。

（4）管理手段选择。推动需求侧管理的手段主要有技术手段、经济手段、引导手段、行政手段等。

（5）政策与标准制定。为了规范和推动需求侧管理，政府需制定相应的管理及激励政策、技术及产品标准等，要求并鼓励电网企业、电力用户及电气产品制造商积极参与开展需求侧管理。

（6）管理计划制定。在资源调查、管理对象选择、管理目标设置的工作成果基础上，结合政府的政策和可供选择的手段，制订年度和中、长期需求侧管理计划。

（7）项目实施。根据计划提出的项目方案，经过评估与选择，确定可实施的项目方案。新的项目应经过试点阶段并取得成功后，进入推广应用阶段。

（8）项目后评估。对项目的实施效果进行科学评价。主要方法是成本效益分析，即对实施项目的投入与项目实施后获得的收益进行分析比较。通常通过年纯收益和投资回收期的长短来评价项目实施效果。

管理资源 主要指终端电力设备节约的电量和转移的高峰电力需求。主要包括：①提高照明、空调、电动机、电加热、冷藏、电化学等系统及设备用电效率所节约的电力和电量；②应用蓄冷、蓄热、蓄电等技术改变用电方式所转移的电力；③通过能源替代、余热回收所节约的电力和电量；④按合同约定执行可中断负荷所转移或节约的电力和电量；⑤以建筑物保温等方法改善用电环境所节约的电力和电量；⑥引导用户改变消费行为减少或转移用电所节约的电力和电量；⑦自备电厂参与调度后电网减供的电力和电量。其中，用户通过改造现有设备或改变用电习惯所获得的资源称为“可改造的资源”，这些资源的节能潜力很大，需求侧管理应合理并有效开展用户的设备更新和改造工作。

管理对象 主要指电力用户的终端用能设备，以及与用电环境条件有关的设施。包括：①用户终端的主要用电设备，如照明系统、空调系统、电动机系统、电加热设备、电化学设备、冷藏设备、热水器等；②可与电能相互替代的用能设备，如以燃气、燃油、燃煤、太阳能、沼气等作为动力的替代设备；③与电能利用有关的余热回收设备，如热泵、热管、余热和余压发电设备等；④与用电有关的蓄能设备，如蒸汽蓄热器、热水蓄热器、电动汽车蓄电瓶等；⑤自备发电厂，如自备背压式、抽汽式热电厂，以及燃气轮机电厂、柴油机电厂等；⑥与用电有关的环境设施，如建筑物的保温、自然采光和自然采暖及遮阳等设施。

管理目标 主要是改变终端用户对电力和电量的需求，最有效地利用有限的电力资源，达到社会效益最大化。采取的主要措施包括：①降低电网峰荷时段的电力需求或增加电网低谷时段的电力需求，以较少的新增装机容量达到电力供需平衡；②节省电力系统的发电量，既满足能源服务的需要又节约社会总资源的耗费。

管理手段 主要包括技术手段、经济手段、引导手段、行政手段等。

（1）技术手段。针对具体的管理对象及其生产工艺和生活习惯等用电特点，采用先进的节能、节电和管理技术，改变用户用电方式或提高终端用电效率。①改变用户用电方式的技术有直接负荷控制，采用时间控制器和需求限制器、低谷和季节性用电设备、蓄能装置、蓄冷和蓄热装置等。②提高终端用电效率的技术有高效照明系统、高效电动机系统、高效变压器及其配电系统、高效电加热技术、高效节能家用电器等。

（2）经济手段。以电价机制、直接经济激励和需求侧竞价等方法，刺激和鼓励用户改变电能消费行为和用电方式，减少电量消耗和电力需求。①电价机制，包括容量电价、峰谷电价、分时电价、季节性电价、功率因数调整电价、电量制电价、蓄冷（热）电价、两部制电价等；②直接经济激励，包括折让鼓励、借贷优惠鼓励、节电设备租赁鼓励等；③需求侧竞价，包括节电效益返还、节电招标竞争等。

（3）引导手段。合理引导用户的电能消费行为，使其愿意接受需求侧管理措施，在使用电能的全过程中自觉挖掘节能潜力。主要包括：①宣传节能政策、普及节能知识、发布节能信息、开展节能咨询服务、开办节能技术讲座等；②举办节能产品展示、免费能源审计、技术推广示范、政府示范等。

（4）行政手段。政府部门通过法律、标准、政策、制度等规范电力消费和市场行为，推动节能增效、避免浪费、保护资源和环境。

实施成效 需求侧管理已经在世界上 30 多个国家和地区得到应用，既包括电力供应比较充裕的发达国家，也包括电力供应比较紧缺的发展中国家，如加拿大、美国、德国、法国、爱尔兰、瑞典、丹麦、芬兰、荷兰、西班牙、葡萄牙、瑞士、巴西、墨西哥、阿根廷、秘鲁、波兰、捷克、希腊、俄罗斯、乌克兰、澳大利亚、新西兰、印度、印度尼西亚、泰国、菲律宾、新加坡、越南、韩国、日本，以及中国台湾省和香港特别行政区。其中，美国、欧盟、法国、英国以及中国都在减少能源消耗、改善电网运行、保护环境等方面取得了显著的成效。

美国需求侧管理 已有 2/3 的州开展电力需求侧管理，东海岸、西海岸各州参与的积极性较高，其中加利福尼亚州起步最早、成效最大，中部产煤州积极性相对较低。1985 年以来，美国需求侧管理的平均节电成本为 2～3 美分/（kW·h），相当于销售侧平均电价的 1/3 左右。采取的主要措施：①实行分时电价，从 20 世纪 60 年代开始，到 2010 年参与分时电价的居民用户数目为 110 万，每年贡献的需求响应容量资源在 2280MW 左右；②实行实时电价，常见的有日前实时电价、两部制实时电价；③实施可中断负荷电价，以大型工商业用户为主，每年的需求响应容量资源贡献超过 1097 万 kW；④大规模推广直接负荷控制项目，主要是对空调和热水器等用电设备实施远方控制和调节，到 2010 年直接负荷控制参与用户数超过 560 万，每年贡献的需求响应容量资源在 9000MW 左右。取得了以下成效：①1975 年以来，加利福尼亚州通过贯彻执行建筑物、电器能效标准，使加利福尼亚州居民和企业的能源费用减少了 560 亿美元；②形成了能源服务产业，吸纳约 3 万人就业；③累计减少用电负荷 1200 万 kW，约占总用电负荷的 15%，相当于少建或缓建 24 个大型发电厂，年节约电量 400 亿 kW·h，减少温室气体排放约 17%。美国联邦能源管理委员会（FERC）的报告表示：2012 年的需求响应潜力为72 000MW，占高峰负荷的 9.2%，比 2010 年增加 25%，其中容量资源负荷、可中断负荷、直接负荷控制和分时电价 4 种项目的负荷削减潜力占 80%，实际削减负荷 20 256MW。

欧盟需求侧管理 欧盟成员国普遍认为保障能源安全、提高能源效率、保护生态环境是实施能效管理和需求侧管理的主要驱动因素，同时将需求侧管理纳入能效管理范畴一并考虑，实施了建立健全行政法规、财税政策、激励机制和市场机制，大力开发并推广节能新产品、新技术，推行建筑节能、热电联产及其他可再生能源等措施。

法国需求侧管理 采取的措施与成效：①通过应用电力负荷监控等措施，日负荷率由 73%提高到 85%左右，相应减少发电容量 19 000MW；②以不同的颜色（绿色、黄色、蓝色）标记峰谷平电价价格，供用户自行选择用电时间，达到削峰填谷的目的；③实行夏时制，法国环境与能源控制署公布的数字显示，实行夏时制每年可节约电量 13 亿 kW·h，相当于节约 29 万 t 标准油当量，占法国总电力消费的 4%，是

一个拥有20万居民的城市一年的耗电总量；④实施节能建筑规范RT2012，对2013年1月以后所有新建筑物设置了最大能源消耗预算。

英国需求侧管理　通过需求侧管理减少CO_2排放，筹集1.65亿美元投资到500多个提高能效的项目中，实现节能6800GW·h，相当于200万家庭的年用电量。英国区域电网在2010年由需求侧响应储备的短期容量备用电力达445MW。2011年颁布实施了关于电力需求侧管理发展的能源法案，实施了温室气体排放交易的绿色新政，规定任何商业项目的开展都需要充分考虑能源投入计划，将节能措施纳入计划中。

丹麦需求侧管理　从1993年开始对家庭和工业行业征收CO_2税，至2005年，减少3.8%的CO_2排放，即CO_2减排230万t，实现了电力消耗零增长。

中国需求侧管理　中国电力需求侧管理可分为节约用电时期、需求侧管理初期和需求侧管理推进期。

(1) 节约用电时期。需求侧管理是20世纪90年代初期与综合资源规划（IRP）一起被引进到中国的，比西方发达国家开展这项工作晚了10多年，但就节约用电工作而言，中国的起步时间并不落后于西方发达国家。从1953年开始，中国开展了以提高负荷率为目标的调整负荷和提倡合理用电的需求侧管理活动，以行政手段推动和引导供电和用电企业调整负荷、合理用电、降低消耗、节约用电。20世纪70年代末，中国政府提出了“能源开发与节约并重，把节约放在首位”的能源发展方针，各级政府部门建立以“计划用电、节约用电、安全用电”为主体的工作体系，重点加强和完善用电单耗及用电负荷管理，发展高效节电设备，推广节电新技术等。1987年国务院颁布了《关于进一步加强节约用电的若干规定》（国发〔1987〕25号），在全国范围内开展了以合理使用能源、节约用电、提高终端电能效率为目标的需求侧管理活动，并颁布了一系列指导合理用电的经济运行技术标准，在工业领域推广应用降损节电技术。1984～1993年间，通过推行各种节电技术措施和加强用电管理，节约用电量约1000亿kW·h，对国民经济的持续高速增长和环境保护发挥了重要的作用。

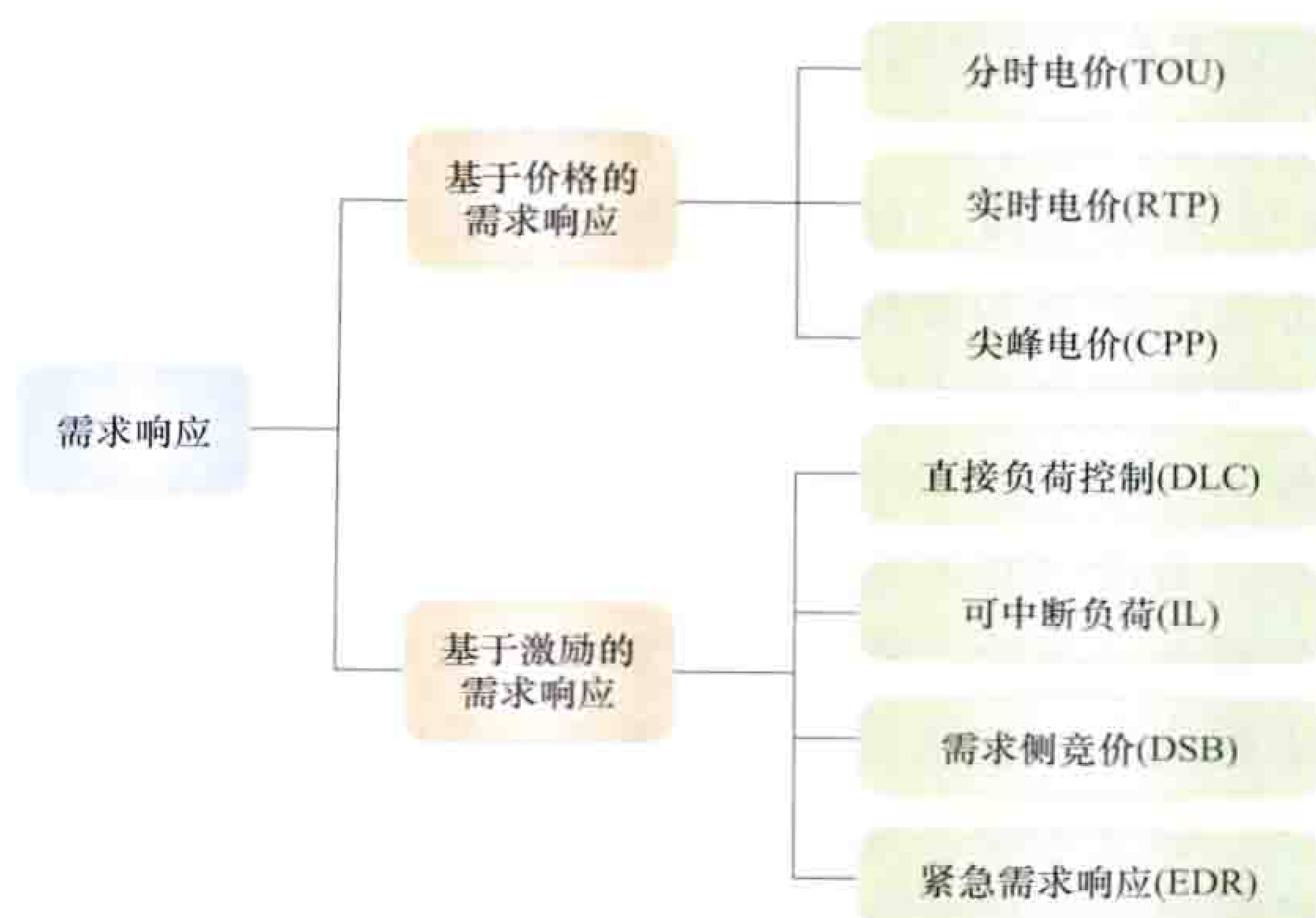
(2) 需求侧管理初期。20世纪90年代初，电力需求侧管理的新概念被陆续引进中国，引起了中国政府和电力部门的高度重视。中国开展了电力需求侧管理试点研究和示范工程建设、宣传培训和经验交流、节电调荷技术推广应用等工作，使传统的节约用电工作得到全面提升。①开展综合资源规划试点。1993年6月，在深圳试点，将需求侧管理纳入综合资源规划。②开展需求侧管理国际间的合作和交流。在政府电力主管部门的组织下，中国电力企业参与了亚太经济合作组织（APEC）能效与节约工作组的活动。1994年与丹麦电力公司合作，开展世界银行技术援助项目——江苏电力需求侧节能项目的研究。1996年开始，与日本、美国、加拿大、法国、意大利的电力公司合作，对石家庄、武汉、重庆等城市的电力需求侧管理进行考察和诊断，并开展电力需求侧管理的技术讲座与经验交流。③推广应用节电和蓄能技术。主要在大型商场、宾馆饭店等公共场所推广紧凑型节能照明灯；在浙江、上海、北京、福州、广州等地区，推广应用冰（水）蓄冷空调技术；在西安、上海、郑州、兰州等地区，推广应用蓄热式电锅炉。④1997年12月，国家电力公司成立了电力需求侧管理指导中心，负责电力需求侧管理的政策研究、宣传培训、技术推广、信息交流等工作。1991～2000年间，累计节电1300亿kW·h，节煤6000万t，减排SO_2 130万t。2004年夏季国家电网公司系统通过峰谷电价、季节性电价、可中断电价等政策平抑了400万kW以上的高峰负荷，约占错避峰负荷总量的20%。

(3) 需求侧管理推进期。21世纪，中国进入了需求侧管理的推进发展期。2007年12月28日，中华人民共和国第十届全国人民代表大会常务委员会第三十次会议修订通过《中华人民共和国节约能源法》通过有序用电、经济杠杆调节用电需求、推广电力蓄能和节电技术等措施，挖掘电力需求侧资源潜力，提高了用能用电效率。①负荷管理、能源替代、能效管理、绿色照明、热泵技术、蓄能技术、变频调速装置、高效电动机、无功补偿装置等产品和技术，在冶金、石化、建材、化工、纺织、机械、医药等行业得到了广泛应用。②2010年出台了《电力需求侧管理办法》（发改运行〔2010〕2643号）、2012年出台了《电力需求侧管理城市综合试点工作中央财政奖励资金管理暂行办法》（财建〔2012〕367号），确定北京、苏州、唐山和佛山为首批电力需求侧管理试点城市。2012年，国家电网公司和中国南方电网有限责任公司通过实施需求侧管理，共节约电力302万kW，节约电量117亿kW·h。“十一五”期间，国家电网公司范围内累计新增热泵供热（冷）面积7550万m^2，推广节能变压器、无功补偿设备、绿色照明、高效电动机等项目22.1万个，开展电采暖、农业电力灌溉、陶瓷窑炉电加热和金属电热处理等能源替代技术项目1.58万项，电蓄热（冷）空调容量新增约492万kW，实施能效电厂项目共计661个。通过实施需求侧管理，累计节约电量435亿kW·h，节约标煤约1500万t，减排二氧化碳3700万t。

xuqiu xiangying

需求响应　(demand response)　用户根据变动的电价信号或通过签订赔偿合同，主动做出调整用电需求的行为。需求响应和负荷控制都是需求侧管理措施，但两者的实施方式有根本区别。负荷控制是用户被动地接受负控装置动作而减少用电负荷需求；需求响应则强调用户根据电价信号主动做出调整负荷需求的反应。

按照用户针对市场价格信号或激励机制做出的响应并改变正常电能消费模式的市场参与行为，需求响应可分为基于价格的需求响应和基于激励的需求响应两类，见图。



需求响应技术的分类

基于价格的需求响应　用户根据收到的价格信号，包括分时电价（TOU）、实时电价（RTP）和尖峰电价（CPP）等，相应调整电力需求的行为。①分时电价响应是需求响应的雏形，也是最普及、最成熟的，有利于引导用户合理用电，移峰填谷，改善负荷曲线，提高电网负荷率。②实时电价响应是在电力市场引入需求侧竞争的最直接方式，用户根据电价决定电能消费量，避免了电价变化带来的风险，但增加了安装通信及控制装置的成本。③尖峰电价响应是用户在电能消费量达临界峰值时，采取临时减负荷措施的行为。根据事先确定的尖峰时段和尖峰电价进行用电计划调整。尖峰电价是在分时电价基础上叠加尖峰费率而形成的。

基于激励的需求响应　用户根据实施机构视电力系统供需状况制定的相应政策，在系统需要或电力供应紧张时减少电力需求并获得相应补偿的行为。这种激励可以是直接补偿，也可以是按不同时段的优惠电价补偿，包括直接负荷控制（DLC）、可中断负荷（IL）、需求侧竞价（DSB）、紧急需求响应（EDR）等。参与用户获得的激励一般有独立于现有电价政策的直接补偿和在现有电价基础上给予折扣优惠两种方式。在需求响应计划实施前，参与的用户需要与需求响应的实施机构签订合同，并在合同中约定用户的基本负荷消费量和削减负荷量的核算标准与计算方法、补偿或激励费率的标准及方法、响应持续时间、合同期内响应次数、违约惩罚措施等。

xuyonglü

需用率

（demand factor）　用电对象最大用电负荷与其用电设备总容量之比，又称需要系数。需用率表明以用电设备总容量为基准的用电需求程度，用以预计用电对象最大负荷。其计算公式为

$$K_{re}=(P_{max}/P_{in})\times 100\%$$

式中 K_{re} 为需用率，%；P_{max} 为用户最大负荷，kW；P_{in} 为用户用电设备总容量，kW。

需用率是与用电对象的用电特点有关的量，不同的用电对象，如车间、企业、行业等，其需用率是不一样的。需用率实际上是一个统计量，是根据一批同类用电对象实际用电情况，统计得出的该类对象的需用率。应用需用率的统计值，可以推算新用电对象的最大用电负荷值，进一步将各类用电对象需用率及用电构成情况相结合指导供用电工程设计。随着科学技术的进步和用电结构的调整等，用电对象的用电需求规律也在逐渐变化，因此，需用率也会随之变化，应间隔一定的时间对需用率进行调查修正。

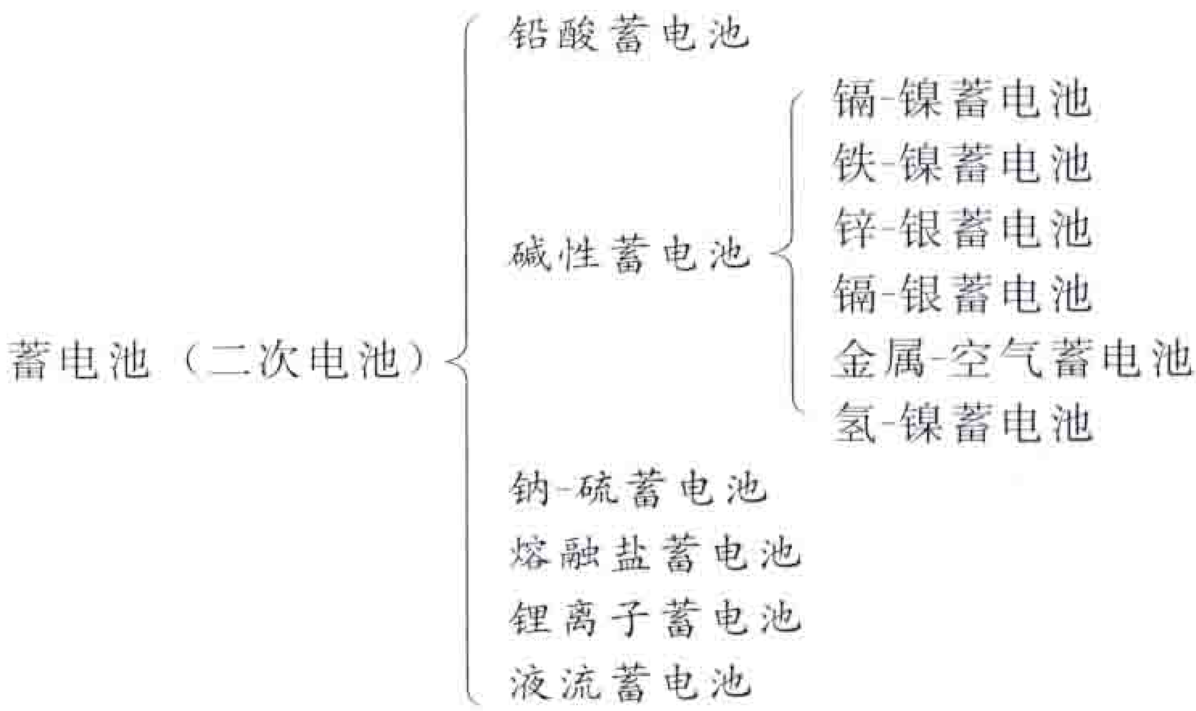
xudianchi

蓄电池

（storage battery）　放电后可用充电的方法使其活性物质回复到初始状态，从而获得再放电能力，即反应是可逆的化学电源，又称二次电池。蓄电池的这种反复充、放电循环次数随蓄电池所采用的电化学体系以及使用的方法而异，可达几十次至几万次。

蓄电池放电时负极活性物质发生氧化反应，释放出电子，输至外电路，正极活性物质接受电子发生还原反应，总反应结果是变化学能为电能。充电时则相反，负极活性物质接受电子发生还原反应，正极活性物质发生氧化反应释放出电子，反应所需能量是由外部电源供给的，即电化学体系中电解体系的反应特性。蓄电池一般由正、负电极及其活性物质、电解质、隔膜、容器等主要部件组成。

分类及性能　蓄电池及其电池组在较大功率放电、汽车起动、照明和点火、电子产品、储能电站、应急电源、人造卫星、宇宙飞船以及电动汽车等场合用途广泛，种类繁多，可分类如下：



常用蓄电池的性能见表。

常用蓄电池的性能

种类	组成			电极反应	单位电池电压（V）	质量比能量（W・h/kg）	体积比能量（W・h/L）	充放电循环周期
	负极	电解液	正极					
铅酸蓄电池	Pb	H_2SO_4	PbO_2	$Pb+2H_2SO_4+PbO_2 \Longleftrightarrow PbSO_4+2H_2O+PbSO_4$	2.0	30～50	50～80	100～600
镉-镍蓄电池	Cd	KOH	NiOOH	$2NiOOH+Cd+2H_2O \Longleftrightarrow 2Ni(OH)_2+Cd(OH)_2$	1.2	30～55	60～90	500～5000
铁-镍蓄电池	Fe	KOH	NiOOH	$2NiOOH+Fe+2H_2O \Longleftrightarrow 2Ni(OH)_2+Fe(OH)_2$	1.2	15～30	20～40	500～1000
锌-银蓄电池	Zn	KOH	Ag_2O	$Ag_2O+Zn+H_2O \Longleftrightarrow 2Ag+Zn(OH)_2$	1.55	100～150	150～250	20～400
镉-银蓄电池	Cd	KOH	Ag_2O	$Ag_2O+Cd+H_2O \Longleftrightarrow 2Ag+Cd(OH)_2$	1.1	50～100	80～150	300～2000
锂离子蓄电池	C_6	$LiPF_6$－EC＋DEC	$LiCoO_2$	$LiCoO_2+nC \Longleftrightarrow Li_{1-x}CoO_2+Li_xC_n$	3.6	100～150	200～400	500～1000
低压氢-镍蓄电池	MH	KOH	NiOOH	$MH+NiOOH \Longleftrightarrow M+NiOOH$	1.2	35～45	90～120	1000～1400

历史与展望　蓄电池的历史应以1859年法国人R. L. G. 普朗特（R. L. G. Planté，1834—1889）发明铅酸蓄电池为开端。百多年来，经不断改进，这种电池仍然是多种蓄电池中用途最广、价格最低廉的，有蓄电池之王的美称。碱性蓄电池是以1901年美国发明家T. A. 爱迪生（T. A. Edison，1847—1931）发明的铁-镍蓄电池为开端。瑞典人W. 琼格纳（W. Jungner）发明的镉-镍蓄电池，虽早于铁-镍蓄电池，但实用化较晚，只是在第二次世界大战前后，几经改进才得到发展，现在已基本上代替了铁-镍蓄电池，成为最有代表性的碱性蓄电池。1982年美国伊利诺伊理工大学（the Illinois Institute of Technology）的R. R. 阿加瓦尔（R. R. Agarwal）和J. R. 塞尔曼（J. R. Selman）发现锂离子具有在石墨中可逆地嵌入和脱嵌的特性，首个可用的锂离子石墨电极由贝尔实验室试制成功。为满足电站储能的需求，1984年，美国人R. J. 雷米克（R. J. Remik）发明了多硫化钠-溴液流蓄电池。1986年，德国建成世界上第一个铅酸蓄电池储能电站，该电站通过电荷的转移完成充/放电过程。为满足高科技、军工等方面发展的需要，很多新型蓄电池也在生产和研制中。1999年中国首条锂离子蓄电池生产线投产。

蓄电池的研究改进一直在两个方面努力：一是提高性能，包括质量比能量、体积比能量、寿命等；二是使用简便，如密封化等。20世纪90年代以来，内燃机汽车排气引起的公害已成为世界性问题，迫使人们重新考虑研制新型的、比能量高的、能快速充电的汽车驱动用蓄电池，多种类型的蓄电池在电动汽车上都有应用实例。

参考书目

郭炳焜．化学电源-电池原理及制造技术．长沙：中南大学出版社，2009.

xuleng kongtiao jishu

蓄冷空调技术　(cooling storage air conditioning)

在用电负荷低谷时段将电能转化为冷量储存在某种介质中，并能在需要时释放出冷量，对空气温度进行调节的方法与措施。利用蓄冷空调技术建成的空调系统称为蓄冷空调系统，它的主要功能不是节约电量，而是为电网的移峰填谷节约电力。与传统空调系统相比，蓄冷空调系统最突出的优点是可全部或部分地转移负荷高峰时的空调用电负荷，增加电网低谷用电，是终端用户移峰填谷的主要技术手段之一；同时，蓄冷空调系统相当于一个备用冷源，一旦临时停电还可作为应急冷源，以保证主要部位的空调需要。蓄冷空调系统主要用于商厦、宾馆、酒楼、写字楼、综合楼、体育馆、医院和旅游中心等。（见空调节电技术）

蓄冷方式　蓄冷空调的蓄冷方式主要有显热蓄冷和潜热蓄冷两种。①显热蓄冷。在蓄冷介质状态不变的情况下，使其降温释放热量后蓄存冷量的方法。②潜热蓄冷。在蓄冷介质温度不变的情况下，使其状态变化释放相变潜热后蓄存冷量的方法。

分类　根据蓄冷介质的不同，蓄冷系统有水蓄冷、冰蓄冷和共晶盐蓄冷3种基本类型。水蓄冷以水为蓄冷介质。冰蓄冷以冰作为蓄冷介质，是蓄冷空调发展的主流。共晶盐蓄冷以共晶盐作为蓄冷介质。

蓄冷空调机理及分类见图1。

特点　常用蓄冷空调系统主要有水蓄冷中央空调系统和冰蓄冷中央空调系统。

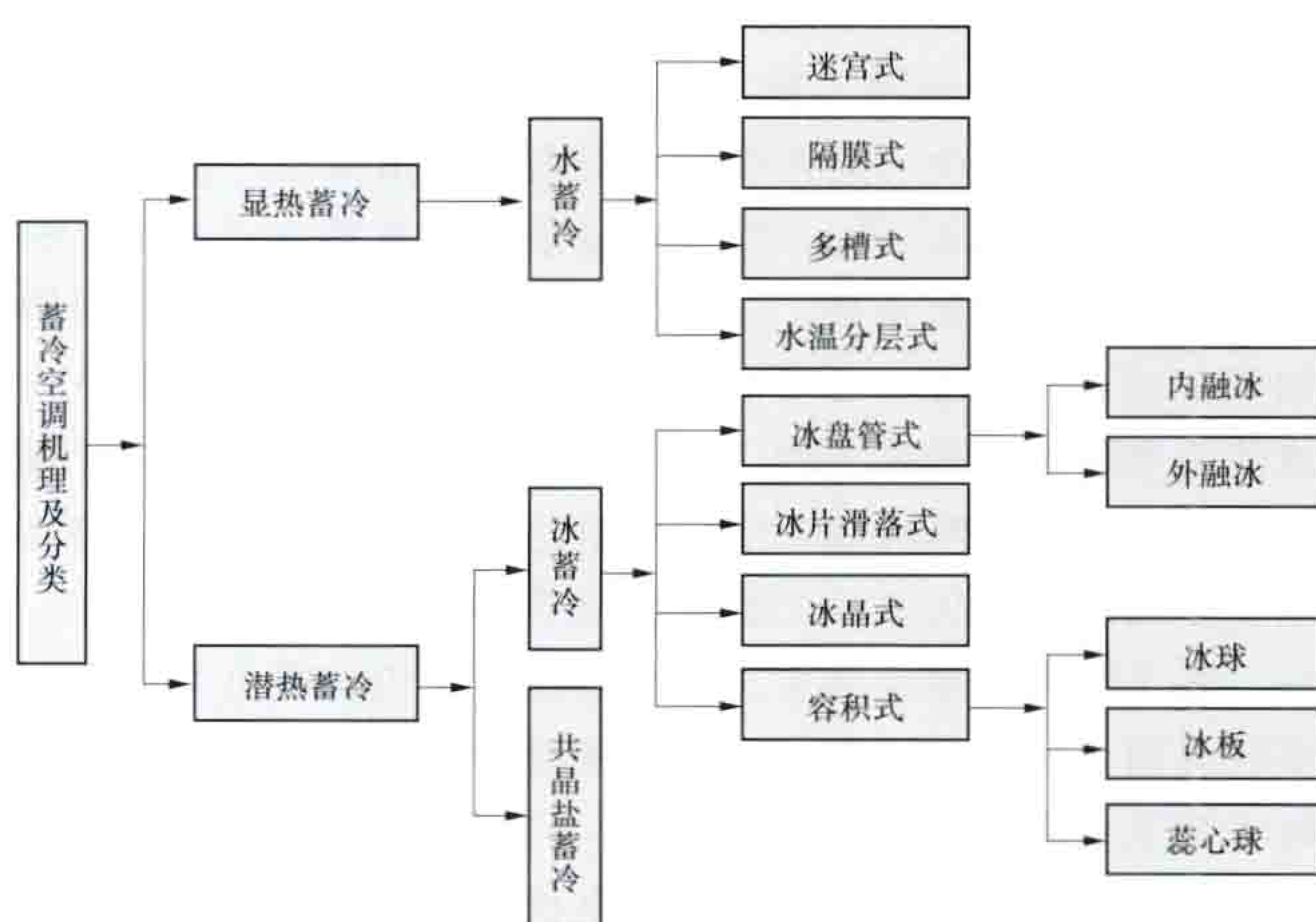


图1　蓄冷空调机理及分类

（1）水蓄冷中央空调系统。与冰蓄冷相比，水蓄冷的主要优点：传统中央空调的主要部件（制冷机、风机、水泵、空调箱、管路等）不必更换，可直接使用；以水作为蓄冷介质，获取方便且价格低廉；不需降低制冷机的蒸发温度，制冷深度不变，可保持较高的制冷效率；蓄冷设备比较简单，易改造，投资少，工期短，见效快。主要缺点：蓄冷介质的蓄冷密度低，蓄冷设备占地面积大和蓄冷效率低。

（2）冰蓄冷中央空调系统。与水蓄冷相比，冰蓄冷的主要优点：冰蓄冷设备占地比水蓄冷设备占地小得多，对大中城市高层楼宇的应用相对有利；冰蓄冷设备的外表面积远小于水蓄冷设备的外表面积，散热损失低，蓄冷效率高；可减少水泵和风机的容量，有利于降低蓄冷空调的造价；蓄冷能力强，临时停电时，可以作为一个蓄冷库当作应急冷源；蓄冷密度大；可实现低温送水运风。主要缺点：在蓄冷工况时的制冷效率低，制冷能力下降。此外，冰蓄冷系统的装置比较复杂，操作技术要求高，投资也比较大，施工期也比较长，更适合于大中型新建筑物采用。

工作模式　采用蓄冷空调的目的就是把空调电力负荷从高峰转移到低谷，实现移峰填谷的功能。图2所示为某用户空调负荷的分布图，转移多少高峰负荷，选择多大蓄冷容量才经济合理，主要取决于蓄冷空调系统采用的工作模式，也就是蓄冷系统与制冷系统相互配合的工作方式。究竟采用哪种工作模式，与空调负荷特性、电网负荷方式、电价制度、设备价格、场地条件等多种因素有关。

蓄冷系统工作模式有全量蓄冷模式和分量蓄冷模式两种。

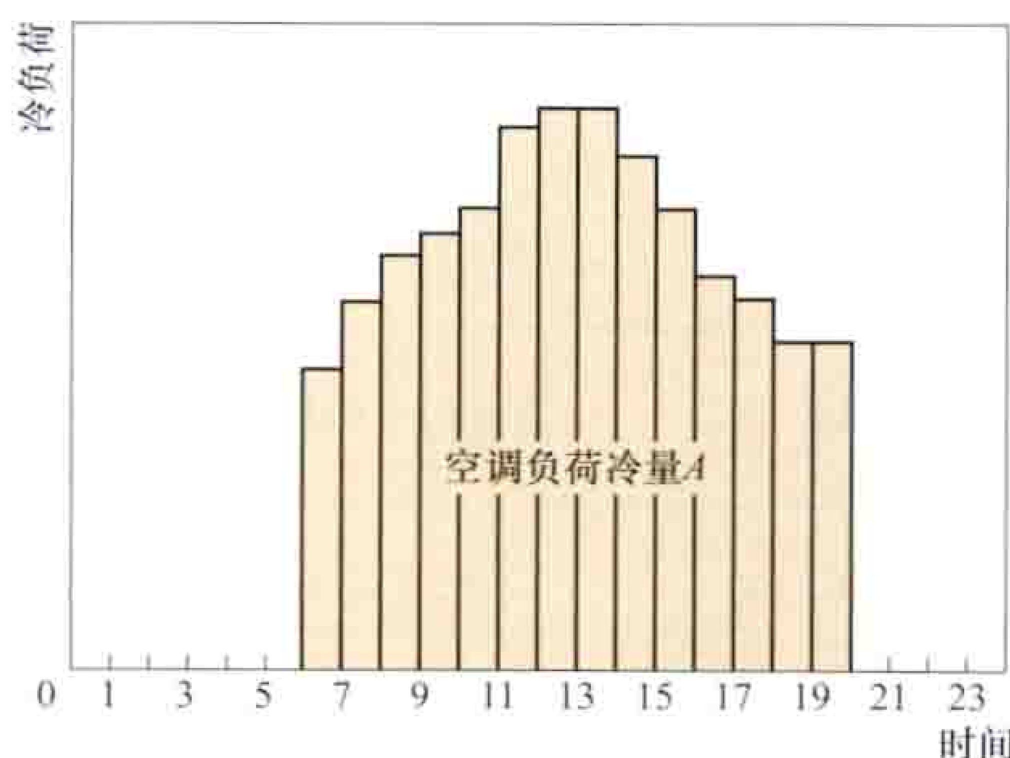


图2　空调负荷分布图

全量蓄冷模式　制冷设备在夜间或非高峰用电时段内满负荷全载运行，提供全部负荷的蓄冷容量。在日间高峰时段内，制冷主机停止运行，完全靠蓄冰设备融

冰释冷来满足空调系统用冷需要。全量蓄冷系统所需配备的蓄冷设备及制冷主机的容量都比较大。图3所示的蓄冷设备容量大于空调负荷冷量A，需要制冷主机制冷运行10h，蓄冷量为B_1+B_2方可满足设计负荷供冷量A的需求。

在下列情况下采用全量蓄冷系统是比较适宜的：①空调供冷时间集中、尖峰负荷时间较短的建筑物，如体育馆、会议厅、展览厅、餐厅、教堂等；②建筑物供电系统容量受限，电力供应不足；③峰谷分时电费差价较大，用电低谷时段电费廉价。

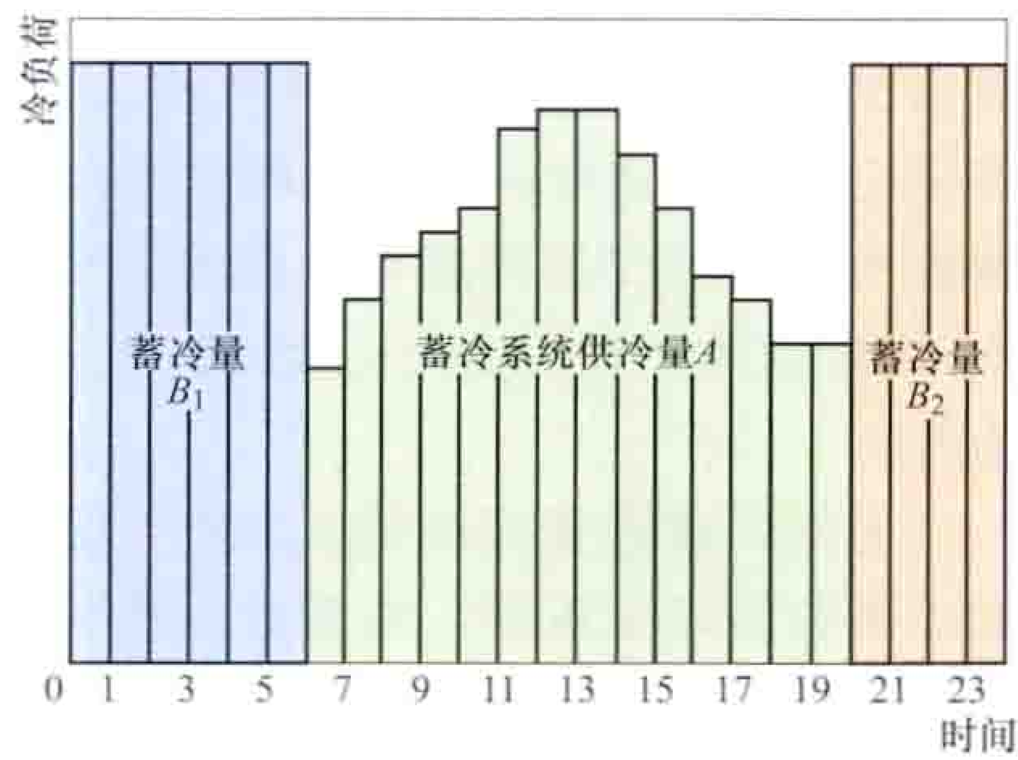


图3 全量蓄冷系统负荷分布

分量蓄冷模式 制冷机组在不同时段分别运行于空调制冷和制冰工况。在日间负荷中，制冷机组按部分空调负荷选定制冷容量，其余部分冷负荷用蓄冰设备融冰释冷满足。夜间制冷机组运行在制冰工况下，将冷量蓄存于蓄冰设备中，这部分冷量再于白天释放出来，提供给部分空调负荷供冷所需。图4中，蓄冷设备容量大于A_1，制冷机组处在日间空调工况下制冷和夜间制冰工况，制冰共10h可蓄存冷量$B_3+B_4=A_1$，A_2由制冷机直接供给。

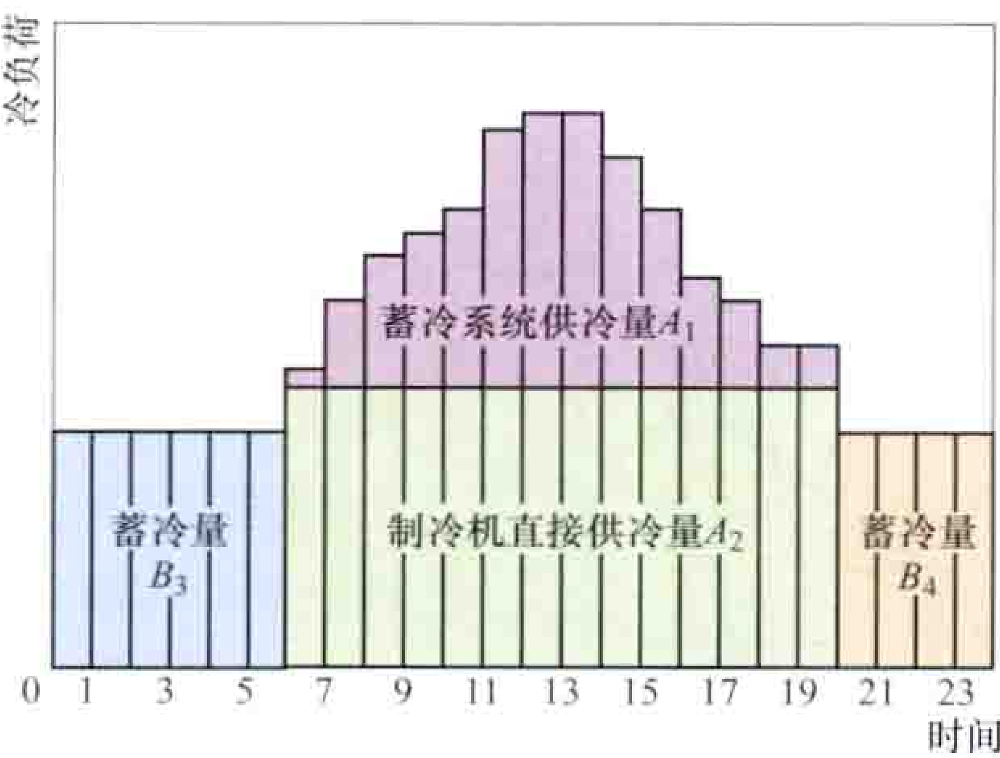


图4 分量蓄冷系统负荷分布

设计合理的分量蓄冷系统，其制冷机组及蓄冰设备的容量都比全量蓄冷系统小，经济效益良好。制冷机组基本上可以全日处于最佳效率下运行，负荷相对比较稳定。在空调过渡季节，分量蓄冷系统亦可当作全量蓄冷系统使用。因此，分量蓄冷系统比全量蓄冷系统有着更加广泛的适用性。

应用效果 蓄冷空调的应用效果与空调负荷特性、蓄冷模式、装备水平、地域位置、场地条件、电价制度、用电政策等一系列因素有关。从中国2012年前投入运行的蓄冷空调中，选择出三个不同类别案例的应用效果进行比较，见下表。为了降低造价，蓄冷装置大部分都设置在地面以下，如楼内地下室以及楼外停车场、喷水池、草坪下等，蓄水装置也设法与消防水池共用。

蓄冷中央空调与传统中央空调比较

序号	用户类别	建筑面积（m^2）	空调系统装机容量降低率（%）	投资增加率（%）	年运行费降低率（%）	投资回收期（月）
1	研究所	40 000	24.6	8.0	14.4	13.0
2	写字楼	33 000	13.5	21.5	31.3	51.6
3	商场	105 656	39.0	20.0	48.2	33.0

参考书目

于航．空调蓄冷技术与设计．北京：化学工业出版社，2007.

xureshi dianguolu

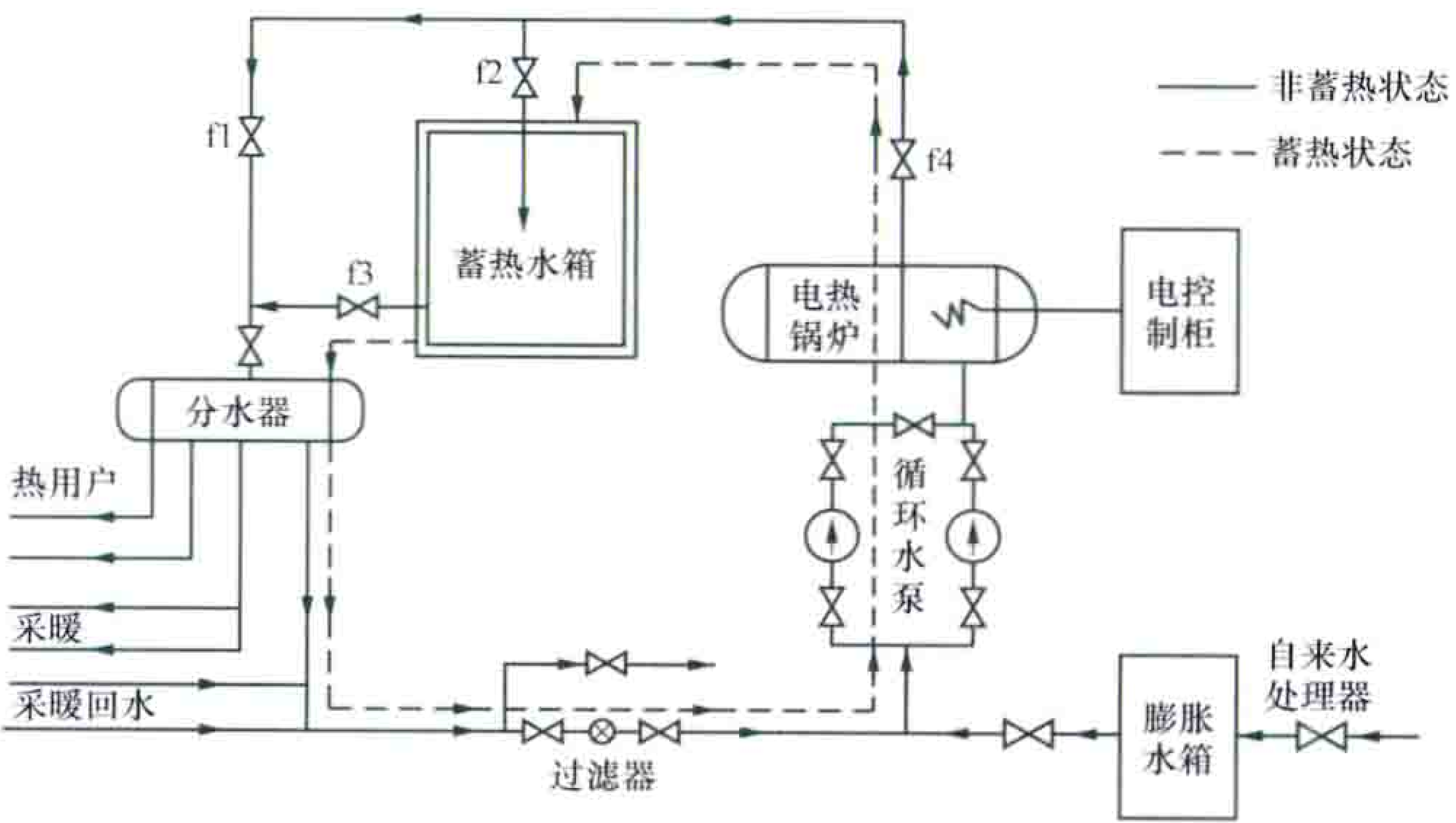
蓄热式电锅炉 （heat storage electric boiler） 兼有电加热与蓄热功能的热力装置。它可充分利用夜间廉价低谷电力，将电能转换为热能，以水为储热媒体，把热能储存在蓄热罐内。在用电高峰阶段，电锅炉停止运行，将蓄热罐内储存的热量释放出来进行供热或供热水，可充分利用电网低谷电力，提高电网负荷率，降低用电成本。

特点 蓄热式电锅炉是一种高效、节能、安全可靠、减少环境污染的电加热设备，其特点为：①全套设备占地面积小，不需烟囱、燃料渣堆放场所。产品成套组装出厂，在现场只需接上电源、水管，即可投入运行，可大大节省基建投资及安装费用。②热效率高，输送方便，损失很小。电锅炉运行热效率在95%以上。起停调节方便，比煤锅炉、油锅炉更能节约能源 。③自动化程度高、运行安全可靠。采用自动控制，快速平稳地控制锅炉电加热管组的循环投切，并且具有漏电保护、短路保护、过电流保护、过电压保护、压力超限保护、水位过低保护等多项保护功能。④清洁环保。不会排出二氧化硫、二氧化碳等有害气体，无黑烟、灰尘，没有废物需要处理，无噪声、无污染。⑤充分利用低谷电价，运行费用低。

分类 蓄热式电锅炉按其结构的不同，可分为蓄热式电热器和蓄热式电锅炉装置。

蓄热式电热器集蓄热功能与电加热功能于一体。将容器内的水加热到一定温度后即自动切断电源停止加热，依靠容器的保温性能将热量储存起来等待使用，当容器水温降到某一程度时，自动投入电源，再度将新补入的冷水加热。蓄热式电热器主要用于居民家庭和需要少量供应热水的场所。

蓄热式电锅炉装置将蓄热装置与电锅炉组合成一个热力系统。它的运行方式有全蓄能式和分量蓄能式两种。全蓄能式是指供热需求完全由用电低谷时的蓄热来满足的运行方式。分量蓄能式是供热需求一部分直供，一部分由用电低谷时的蓄热来满足的运行方式。蓄热式电锅炉系统见图。



蓄热式电锅炉系统图

应用范围 蓄热式电锅炉的适用范围较广，可以满足各种环境及条件的需要，适用于宾馆、饭店、机关、学校、住宅等的取暖和洗浴。

xuanzhuan bianyaqi

旋转变压器 （electrical resolver；resolver） 以可变耦合变压器原理工作的控制电机。其输出电压与转子转角呈确定的函数关系。旋转变压器在各种测量和控制系统中，用于坐标变换、函数解算、转角的精密检测及角度数据传输等。

分类 旋转变压器按二次侧输出电压与转子转角的函数关系分为正余弦旋转变压器、线性旋转变压器和特种函数旋转变压器。比例式旋转变压器、旋变发送机、旋变差动发送机和旋变变压器都属于正余弦旋转变压器。按是否有电刷分为有刷旋转变压器和无刷旋转变压器。还有多极旋转变压器、双通道旋转变压器和磁阻式旋转变压器等。

结构与原理 旋转变压器的结构与单相感应电动机相似，一般是一对极，图 1（a）所示为原理示意图。在定子和转子上都装有两相对称绕组（在空间相差 90°电角度），转子上的两相绕组 A 和 B 分别经集电环和电刷引出。定子上的绕组 D 为励磁绕组，其轴线为 d，绕组 Q 为交轴绕组，其轴线 q 与轴线 d 在空间呈 90°电角度。转子转角是指以 d 轴为基准，转子绕组 A 的轴线与 d 轴的夹角 α。

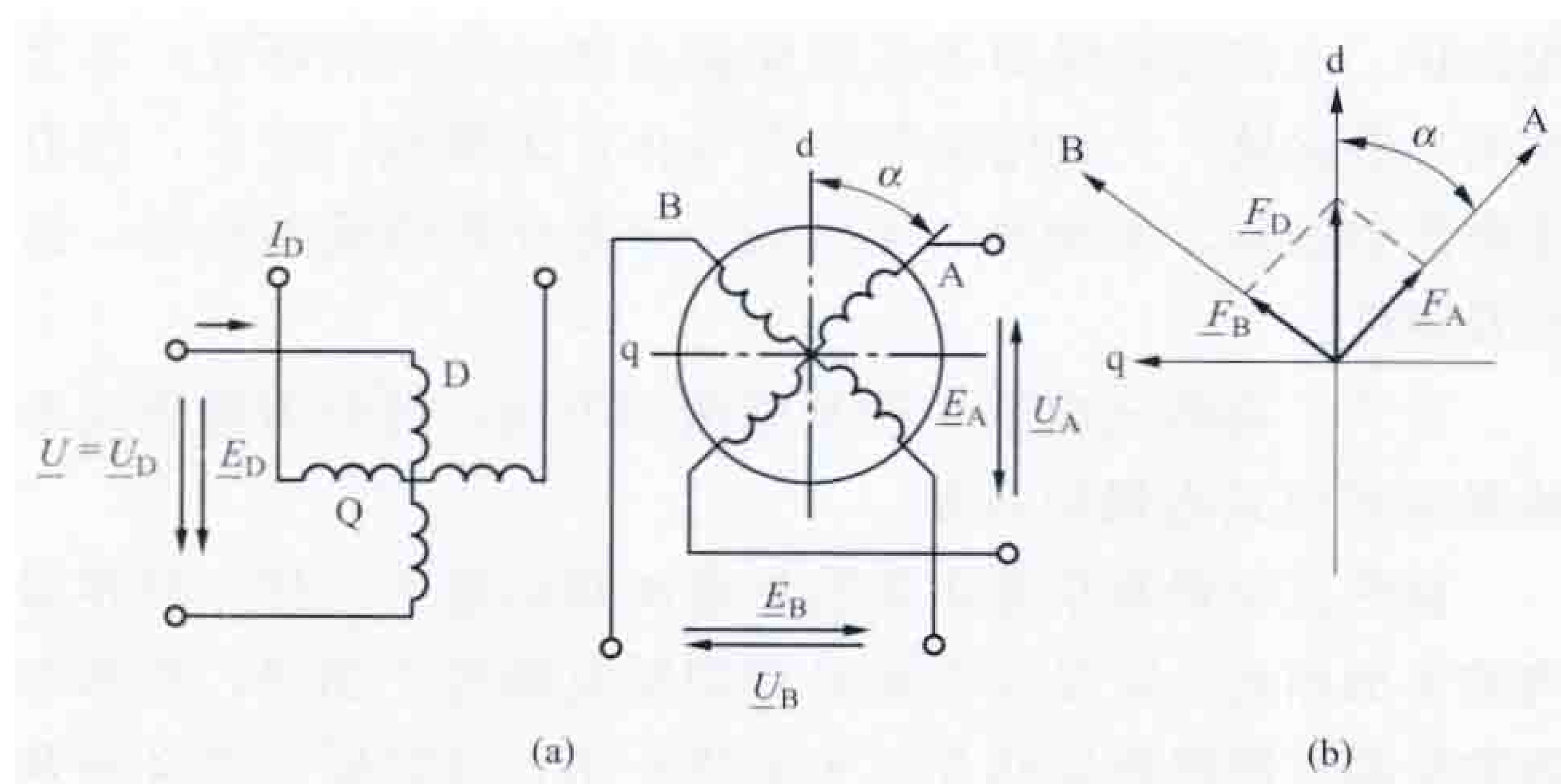


图 1 空载时正余弦旋转变压器

（a）原理示意图；（b）磁通势相量图

正余弦旋转变压器的励磁绕组 D 接交流电压 $\underline{U}$，转子上的绕组开路时为空载运行，这时励磁绕组 D 中有励磁电流 $\underline{I}_D$，并产生励磁磁通势 $\underline{F}_D$，如图 1（b）所示。$\underline{F}_D$ 是 d 轴方向上空间正弦分布的脉振磁通势。将 $\underline{F}_D$ 分成两个脉振磁通势 $\underline{F}_A$ 和 $\underline{F}_B$，$\underline{F}_A$ 在绕组 A 的轴线上，$\underline{F}_B$ 在绕组 B 的轴线上，即

$$\left.\begin{aligned}\underline{F}_D&=\underline{F}_A+\underline{F}_B\\ \underline{F}_A&=\underline{F}_D\cos\alpha\\ \underline{F}_B&=\underline{F}_D\sin\alpha\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

磁路不饱和，且忽略各绕组漏阻抗时，绕组 A 和 B 的输出电压有效值分别为

$$\left.\begin{aligned}U_A&=E_A=kU\cos\alpha\\ U_B&=E_B=kU\sin\alpha\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中电压比 $k=\dfrac{W_2}{W_1}$，W_1 和 W_2 分别为定子和转子绕组的有效匝数。

式（2）表明，当电源电压 U 恒定时，绕组 A 和 B 的输出电压 U_A 和 U_B 分别与转子转角 α 呈余弦和正弦函数关系。

当转子上某一绕组接负载时，该绕组中便有电流，并产生电枢反应磁通势。这时，如果转子上的另一绕组空载，则电枢反应产生 q 轴磁通势，使输出电压与转子转角 α 之间的正弦或余弦函数关系发生畸变。为了消除输出电压的畸变，需对电枢反应产生的 q 轴磁通势加以补偿，有一次侧补偿和二次侧补偿两种办法。一次侧补偿是在转子绕组 A 和 B 上接相同大小的负载阻抗，即 $Z_A=Z_B$。二次侧补偿是使定子上的绕组 Q 通过阻抗 Z_Q 短接。可以证明，当 Z_Q 等于旋转变压器励磁电源的内阻抗时，可以消除输出电压的畸变。一般情况下，电源内阻抗数值很小，绕组 Q 两端短接即可。实际应用时，通常采用二次侧和一次侧同时补偿。旋转变压器输出电压畸变的程度与负载的大小有关，负载阻抗 Z_A 和 Z_B 数值越大，畸变越小。因此 Z_A 和 Z_B 数值应尽量大些为好。

比例式旋转变压器是在结构上增加调整和锁紧转子位置的正余弦旋转变压器，在系统中作为调整电压的比例元件。旋变发送机是将转子角位移转换成与之相对应的四线电信号输出的正余弦旋转变压器。旋变差动发送机是接收来自旋变发送机的电信号，输出对应于发送机和自身角位移之和（或差）的电信号的正余弦旋转变压器。旋变变压器是接收来自旋变发送机（或差动发送机）的电信号，输出一个正比于发送机（或差动发送机）角位移和自身角位移之差的正余弦旋转变压器。

线性旋转变压器是在一定转角范围内，输出电压与转子转角呈线性函数关系的旋转变压器。当转子转角 α 很小时，正余弦旋转变压器的正弦输出绕组输出电压 $U_B=kU\sin\alpha\approx kU\alpha$。但是转角 α 的范围太小，不能满足使用要求。要扩大转角 α 的范围，可以按图 2 接线。其中绕组 Q 的外接阻抗 Z_Q 的数值等于电源内阻抗，以使绕组 Q 补偿绕组 B 负载时的 q 轴磁通势。这时，输出电压为

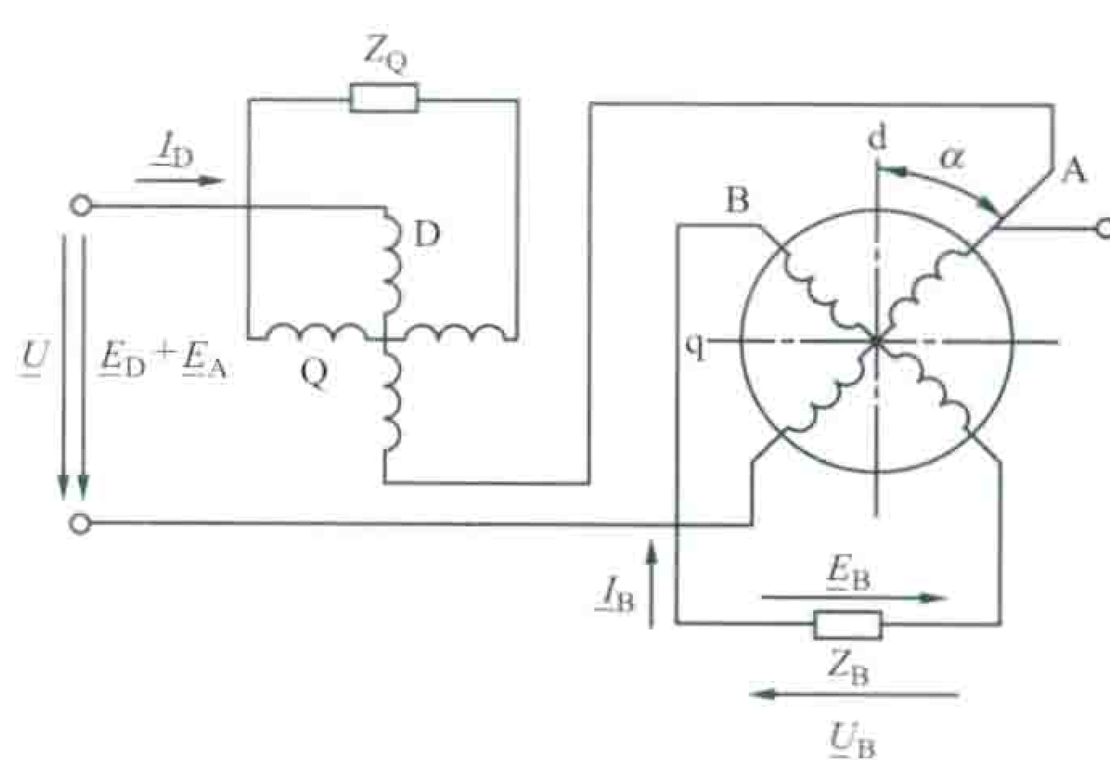


图 2 线性旋转变压器

$$U_B=U\frac{k\sin\alpha}{1+k\cos\alpha}\tag{3}$$

式中若取 $k=0.5$，则 α 在 ±37.4°的范围内，U_B 与 U 可认为是直线关系，误差不超过 ±0.1%；若取 $k=0.54$，则 α 在 ±60°的范围内，误差不超过 ±0.1%，显然，转角 α 的范围已经比较大了。

单绕组线性旋转变压器是一次侧和二次侧各仅有一套绕组的线性旋转变压器。

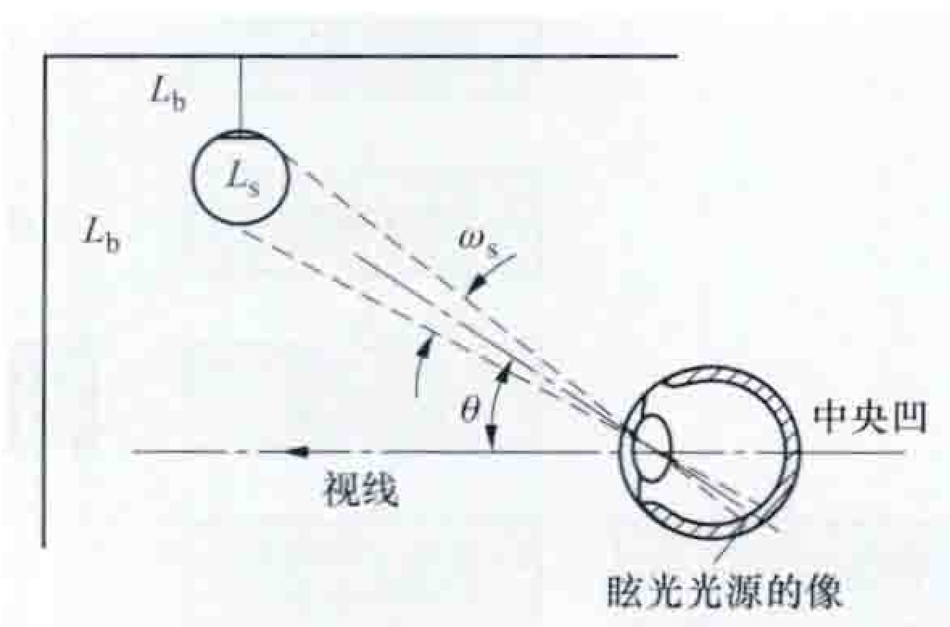
特种函数旋转变压器是在一定的转角范围内，输出电压与转子转角呈某种特定函数（除正、余弦函数和线性函数外）关系的旋转变压器。

有刷旋转变压器在定、转子上都有绕组，转子绕组的电信号通过滑动接触，由转子上的集电环和定子上的电刷引进或引出。由于有刷结构的存在，使得旋转变压器的可靠性难以得到保证，因此已很少使用。无刷旋转变压器是没有电刷和集电环结构且允许连续旋转的旋转变压器。多极旋转变压器是极对数大于 1 的旋转变压器，其精度比单对极的要高一

个数量级以上。双通道旋转变压器是单对极和多对极旋转变压器的组合。磁阻式旋转变压器是按定转子之间可变磁阻效应原理工作的无刷多极旋转变压器。

xuanguang

眩光 (glare) 视野中的亮度分布或亮度范围不适宜，或存在极端的亮度对比，以致引起不舒适感觉或降低观察细部或目标能力的视觉现象。引起视觉不舒适的眩光称为不舒适眩光；降低视觉工效和可见度的眩光称为失能眩光；在一定时间内完全看不到视觉对象的强烈的眩光称为失明眩光。就眩光的成因而言，还可将眩光分为直接眩光和反射眩光。直接眩光是由灯、灯具和采光窗等高亮度的光源直接引起的；反射眩光是从反射比高的表面，特别是像光亮的油漆、光泽的金属这类镜反射表面反射的高亮度造成的。眩光感觉的程度取决于眩目光源的亮度、大小、位置、光源数量及眼睛适应亮度的水平等因素。



影响眩光的因素

如图所示，单个光源产生的不舒适眩光感觉与外界物理因素的关系，用下式表达，即

$$G=\frac{L_s^a\omega_s^b}{L_b^c f(\theta)}$$

式中 G 为表示眩光主观感觉的量值，又称眩光常数；L_s 为光源在观测方向上的亮度，cd/m^2；ω_s 为光源对观测者眼睛形成的立体角，sr；L_b 为观测者视野内的综合亮度（背景亮度），cd/m^2；$f(\theta)$ 为光源对视线形成的偏角 θ 的一个复合函数，$\theta<27°$ 会产生强烈眩光，$\theta>45°$ 为微弱的眩光区；a、b、c 为加权指数，各国研究人员实验结果不同，中国研究报告的数字是 $a=1$，$b=0.63$，$c=0.28$。多个光源产生的总眩光效应为单个光源的眩光效应之和。

当高亮度的光源靠近作业时，常会出现失能眩光。失能眩光的程度可以借助等效光幕亮度 L_v 定量表示。L_v 是一个假想的均匀视野亮度，它被叠加在作业上，使作业可见度下降，其降低的量与出现失能眩光时可见度的降低量相同，即

$$L_v=10\times\sum_n\frac{E_n}{\theta_n^2}$$

式中 L_v 为等效光幕亮度，cd/m^2；E_n 为第 n 个光源在垂直于视线的平面上眼睛处产生的照度，lx；θ 为视线同第 n 个光源之间的夹角，(°)。

上式适用于 $\theta_n=1.5°\sim60°$。这时作业的有效对比为

$$C_e=\left|\frac{(L_t+L_v)-(L_b+L_v)}{(L_b+L_v)}\right|=\left|\frac{L_t-L_b}{L_b+L_v}\right|$$

式中 C_e 为有效作业对比；L_t 为作业细节的亮度，cd/m^2；L_v 为等效光幕亮度，cd/m^2；L_b 为作业背景的亮度，cd/m^2。



yahuhan

氩弧焊 (argon-arc welding) 用氩气作保护气体的气体保护电弧焊。

yangji yanghua

阳极氧化 (anodizing) 以某种金属（主要是铝）制件或其他物质为阳极，在适宜的电解液中进行电解，使其表面形成具有某种功能的氧化物薄膜的过程。金属氧化物薄膜有耐腐蚀、耐磨损、绝缘等性能，可作金属的保护层或涂漆的底层。氧化物薄膜还可以吸附多种有机和无机染料，使金属制品表面呈现鲜艳的色彩，起装饰作用。有色金属铝、镁及其合金都可进行阳极氧化处理，这种方法广泛用于飞机、汽车、电子电器、仪器仪表的零部件以及日用品、工艺品和建筑装饰等方面。

铝的阳极氧化一般是以铝制件为阳极，铅板为阴极，在酸性溶液中电解，在阳极表面生成附着牢固的氧化铝薄膜。随着氧化铝膜厚度的不断增加，阳极电阻不断增大，电流逐渐减小，用提高电压的办法可增大电流，使氧化铝膜继续增厚，直至达到所需要的厚度。根据用途不同，膜厚一般在0.5～250μm之间。生成的氧化铝膜是微孔性膜，由两层氧化膜组成，底层是与壁垒膜结构相同的致密的薄氧化物层，而主体部分是多孔层结构，其孔径为0.015～0.04μm，每10μm^2有60～800个孔。微孔性膜要在0.04～0.05MPa压力的水蒸气中进行封孔处理，由于水合作用以及体积的增加，使氧化铝膜成为耐腐蚀、无针孔、稳定的保护膜。氧化铝膜是绝缘的，如需做成导电部件，可在需要导电的局部，在阳极处理前涂上保护剂层，即可得到导电部分。

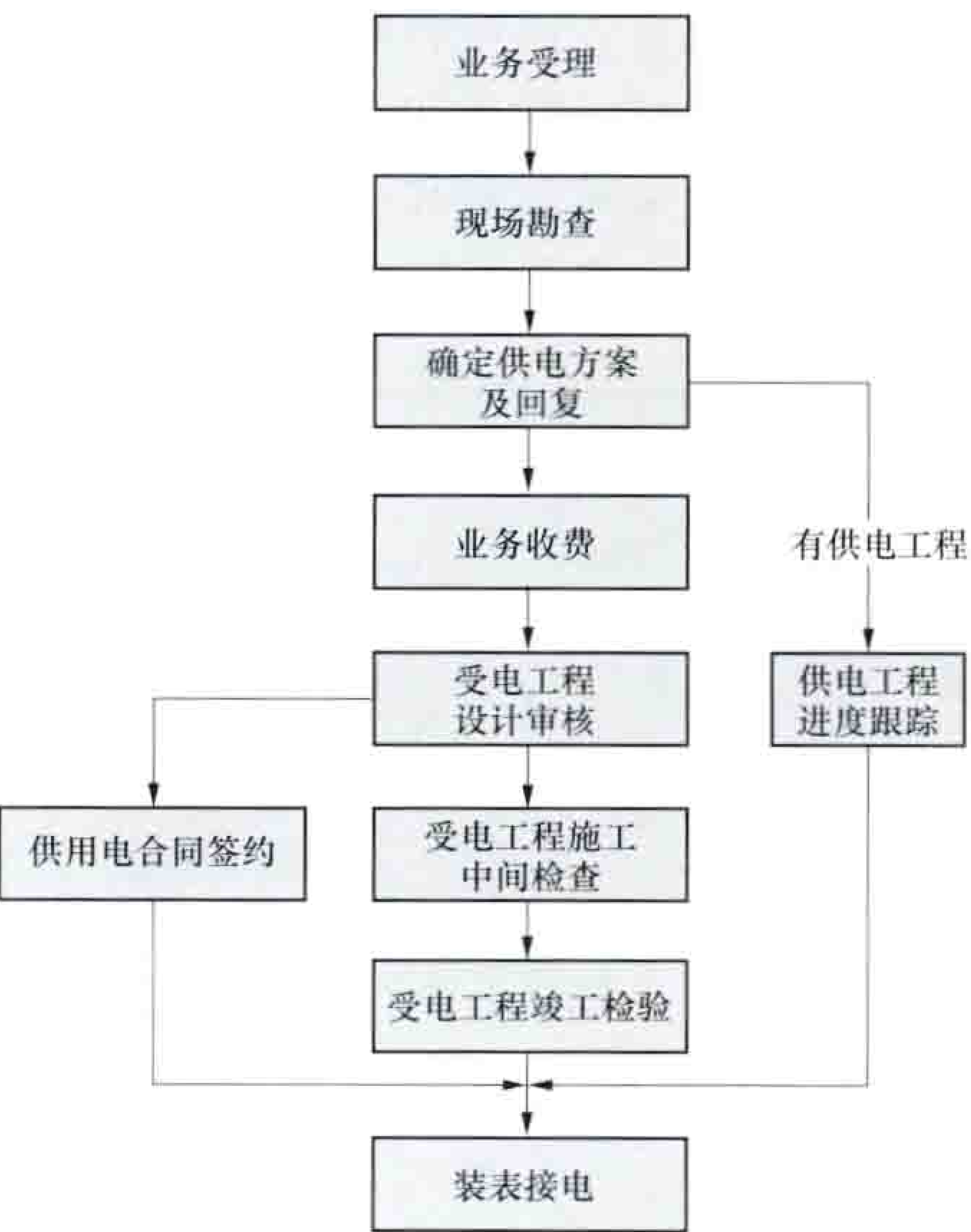
yekuo baozhuang guanli

业扩报装管理 (procedures for connecting installation by customer management) 以满足用户新装增容及变更用电需求为目的而实施的业务活动。业扩报装管理主要围绕增加和扩大供电规模、让用户能用得上电、用得好电而开展，各国电力公司也都在营业管理部门内建立业扩报装管理的工作体系，负责办理接待用户业扩报装事宜，尽力做到在用户希望开始用电的日期前供电。

新装增容与变更用电合称业扩报装，也称业务扩充，简称业扩，包括从受理用户用电申请到向用户正式供电的全过程。业扩报装工作的业务范围有：受理新建、扩建供电设施和新建、改建受电装置，办理用户迁址用电、换表、减容、暂停、变更户名等变更用电；对大型新建用户还要在用户选址前，协助用户以合理节约电能和减少造价为目标，优选供电方式和厂址等。业扩报装一般按用户用电容量的大小和供电电压等级高低实行分级管理。

业扩报装管理的主要工作流程包括业务受理，现场勘查，确定供电方案及回复，业务收费，用户受电工程的设计审核、施工中间检查及竣工检验，供用电合同签约，装表接电等，如图所示。

业务受理　接受用户的业扩报装申请。查验用户用电资料的完整性和有效性，记录用户对用电可靠性的要求。



业扩报装流程图

现场勘查　核查用户的用电容量、用电类别等用电需求，根据其用电类别、用电规模以及现场供电条件，对供电可能性和合理性进行调查，初步提出供电、计量和计费方案。

确定供电方案及回复　根据现场勘查结果、配网结构及用户用电需求，拟定供电方案意见书，包括用户接入系统方案、用户受电系统方案、计量方案、计费方案等。方案审批后回复用户。中国《供电营业规则》规定，对已受理的用电申请，其供电方案的答复时间要求：自受理之日起，居民用户最长不超过5天；低压电力用户最长不超过10天；高压单电源用户最长不超过1个月；高压双电源用户最长不超过2个月。

业务收费　按确定的收费项目和收费金额收取业务费用。中国政府规定，在业扩报装环节可以收取的业务费是高可靠性供电费用，即对申请新装及增加用电容量的两路及以上多回路供电（含备用电源、保安电源）的用户，在国家没有统一出台高可靠性电价政策前，除供电容量最大的供电回路外，对其余供电回路可适当收取高可靠性供电费用。

受电工程设计审核　又称设计审核或图纸审核。根据国家和电力行业相关设计标准，审查用户受电工程设计文件和有关资料，倡导采用节能环保的先进技术和产品，禁止使用国家明令淘汰的产品。

受电工程施工中间检查　在用户受电工程施工期间，供电企业根据审核同意的设计文件和施工标准，对其受电工程中的隐蔽工程进行的检查，又称中间检查。检查项目包括：线路架设或电缆敷设检查；电缆通道开挖许可及开挖检查；封闭母线及计量箱（柜）安装检查；高、低压盘（柜）装设检查；配电室接地检查；设备基础建设检查；安全措施检查等。

受电工程竣工检验　对用户受电工程质量进行的全面检

查验收，又称竣工检验或竣工验收。竣工检验需按照国家和电力行业颁发的设计规程、运行规程、验收规范和各种防范措施等要求，根据用户提供的竣工报告和资料进行。检验项目包括：线路架设或电缆敷设检验；高、低压盘（柜）及二次接线检验；配电室建设及接地检验；变压器及开关试验；环网柜、电缆分支箱检验；中间检查记录；交接试验记录；运行规章制度及入网工作人员资质检验；安全措施检验等。

供用电合同签约　签订明确供用电双方权利和义务的法律文书过程。供用电合同是供用电双方共同遵守的行为准则的重要法律文书，内容包括供电的方式、质量、时间，用电容量、地址、性质，计量方式，电价、电费的结算方式，供用电设施的维护责任等条款。

装表接电　供电企业将申请用电者的受电装置接入供电网，并送电的过程，又称接电。受电工程检验合格并签订供用电合同后，供电企业在产权分界点安装电能计量装置，并组织接电。送电后，检查电能表运转是否正常，相序是否正确，并对电能计量装置实施封印。

见营业管理。

yeliu xudianchi

液流蓄电池　(flow battery)　正、负极活性物质都为液态形式的蓄电池。其正、负极既是活性物质，又是电解液，分别储存在两个容器内。电池工作时，正、负极活性物质分别通过循环泵泵入由具有离子选择性的隔膜隔开的电堆内，发生氧化还原反应，进行化学能与电能的转化。液流蓄电池没有固态反应，不发生电极物质结构形态的改变。

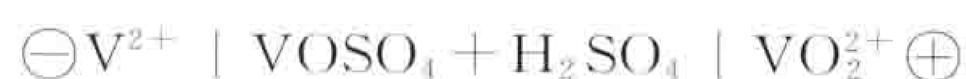
原理　在氧化还原反应中，氧化剂与还原产物、还原剂与氧化产物共轭的氧化还原体系称为氧化还原电对，简称电对。用于液流蓄电池的电对应具有溶解度大，化学性能稳定，电极反应可逆性高，无析氧析氢副反应，电对间的电位差大等特点。因此，真正有实用价值的液流体系的电对并不多，比较成熟并示范运行的体系有全钒氧化还原液流蓄电池、多硫化钠-溴电池、$Zn\text{-}Cl_2$ 电池、$Cr\text{-}Cl_2$ 电池、$Zn\text{-}Br_2$ 电池、Fe-Cr 电池等。其中，全钒氧化还原液流蓄电池以其自身的优势，受到学界的普遍关注和政府的支持。

全钒氧化还原液流蓄电池简称钒电池，钒是一个多种价态变化的元素，主要价态有 V^{5+}、V^{4+}、V^{3+}、V^{2+}，且在一定条件下均能以水溶液的状态存在，在酸性介质中形成相邻价态的电对。其相邻电对的电极电位如下



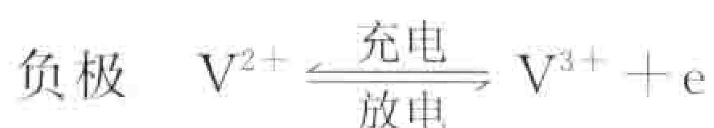
$$VO_2^+ \xrightarrow{1.004} VO^{2+} \xrightarrow{0.36} V^{3+} \xrightarrow{-0.225} V^{2+}$$

钒电池采用的正极电对为 V^{5+}/V^{4+}，负极电对为 V^{3+}/V^{2+}。在酸性溶液中，V^{5+} 和 V^{4+} 离子分别以 VO_2^+ 和 VO^{2+} 形式存在。电池充电时，正极活性物质为 VO_2^+，负极活性物质为 V^{2+}；放电过程，VO_2^+ 被还原为 VO^{2+}，V^{2+} 被氧化为 V^{3+}。电池内部通过质子 H^+ 导电，在 H_2SO_4 电解液中，其电化学式为

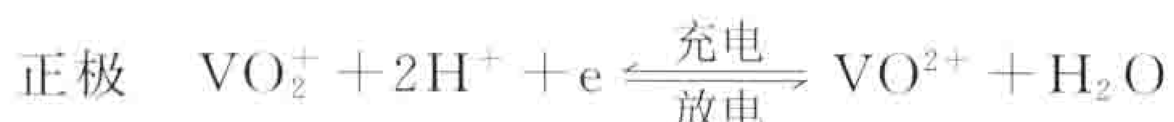


$$\ominus V^{2+} \mid VOSO_4 + H_2SO_4 \mid VO_2^{+} \oplus$$

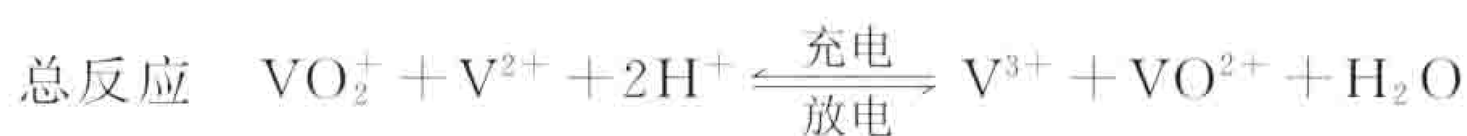
充、放电时的电池反应为



负极　$V^{2+} \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} V^{3+} + e$



正极　$VO_2^+ + 2H^+ + e \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} VO^{2+} + H_2O$



总反应　$VO_2^+ + V^{2+} + 2H^+ \underset{\text{放电}}{\overset{\text{充电}}{\rightleftharpoons}} V^{3+} + VO^{2+} + H_2O$

正、负极溶液的浓度均为 1mol/L 的电池标准电势差为 1.26V，浓度升高，电势差会相应增大。

结构　主要由电堆、储液器及循环泵三大相对独立的部分组成。

电堆是电池系统的核心，由数十节至数百节单电池串、并联而成。电堆由电极和隔膜组成。

电极由集流体和反应电极组成，集流体是电堆与外界进行能量交换的界面，由端电极板和双极性电极板组成，对集流体有导电性能好、耐腐蚀、不透液、机械性能好、不变形等要求，一般以碳素材料及碳素类复合材料为主。反应电极承担液流活性物质发生电化学反应的载体，不参与电化学反应，对其有性能稳定、机械性能好及电化学活性高等要求，有金属电极、碳素电极和复合电极。

隔膜的作用是隔离正、负极电解液，充、放电时提供电荷（通常是 H^+）传导通道，满足要求的隔膜非常少，常用的有 Nafion 膜和聚烯烃类膜，Nafion 膜正、负极离子相互渗透，聚烯烃类膜稳定性差。

储液器是储存电解液的容器，电解液里正、负极活性物质的浓度和稳定性是电池性能的关键，浓度越高，电池的比能量越高，但高到一定程度会引起电解液水解、缔合或析出沉淀。

循环泵的作用是带动电解液使之在电池充、放电时处于流动状态。

根据电解液是否流动，电池可分为静止型和流动型两种。前者电解液不流动，反应区就是电解液储存区，电池容量有限，易产生浓差极化现象，应用场合有限。后者的正、负极电解液分别存放在两个储液器中，电池充、放电时，电解液在循环泵的带动下处于流动状态，可以消除浓差极化。由于带有储液器，流动型电池不仅容量大，而且可以通过更换储液器的方式来快速“充电”，这种类型的电池应用广，其结构示意见图 1。

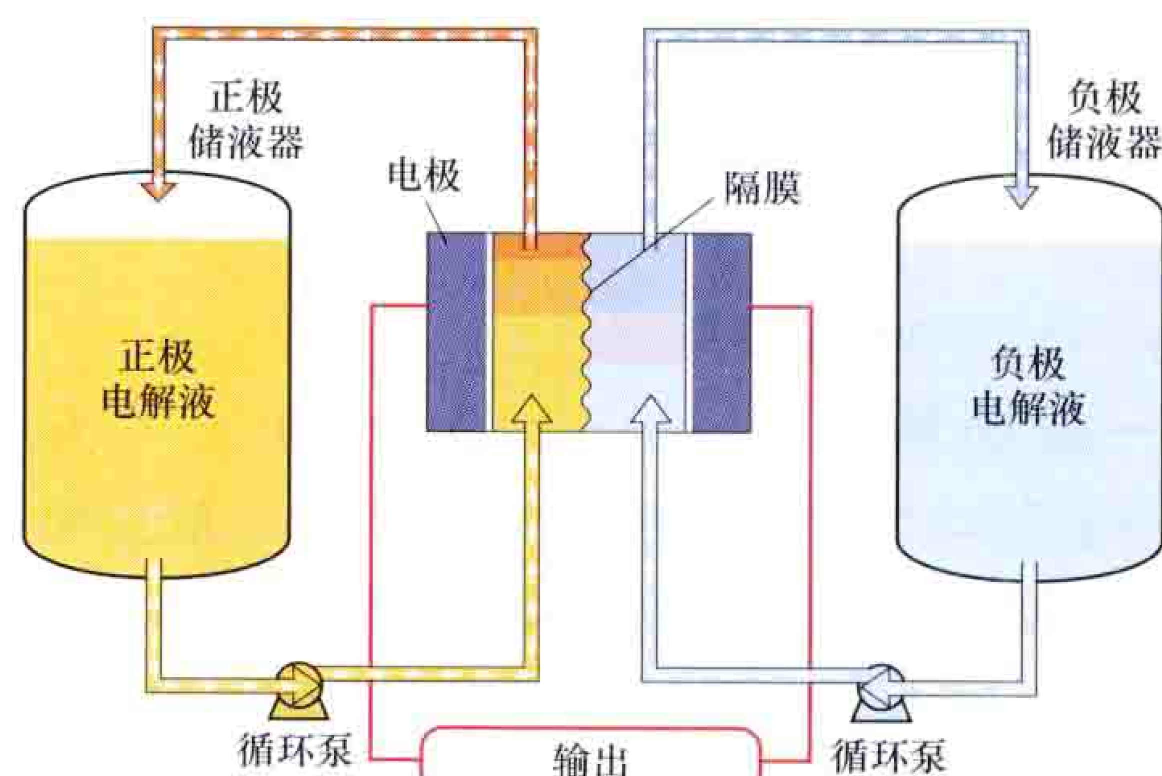


图 1　流动型液流电池结构示意图

改善隔膜的离子选择性，提高电解液浓度、稳定性，提高电极材料电化学活性、稳定性是液流电池研究领域的三大课题。

电池特性　主要包括充、放电特性，功率、电动势、容量、寿命等。

液流蓄电池的两个电对由不同电极电位的两个液流电对组成，充电时，在隔膜的一侧，高电位电对的活性物质在电池的正极从低价态氧化成高价态；而在隔膜的另一侧，低电位电对的活性物质在电池的负极由高价态还原成低价态。放电时则相反。钒电池的充、放电特性曲线见图 2。

输出功率取决于电堆的大小和电极反应的界面特性，电

池组的容量取决于活性物质的浓度和数量。

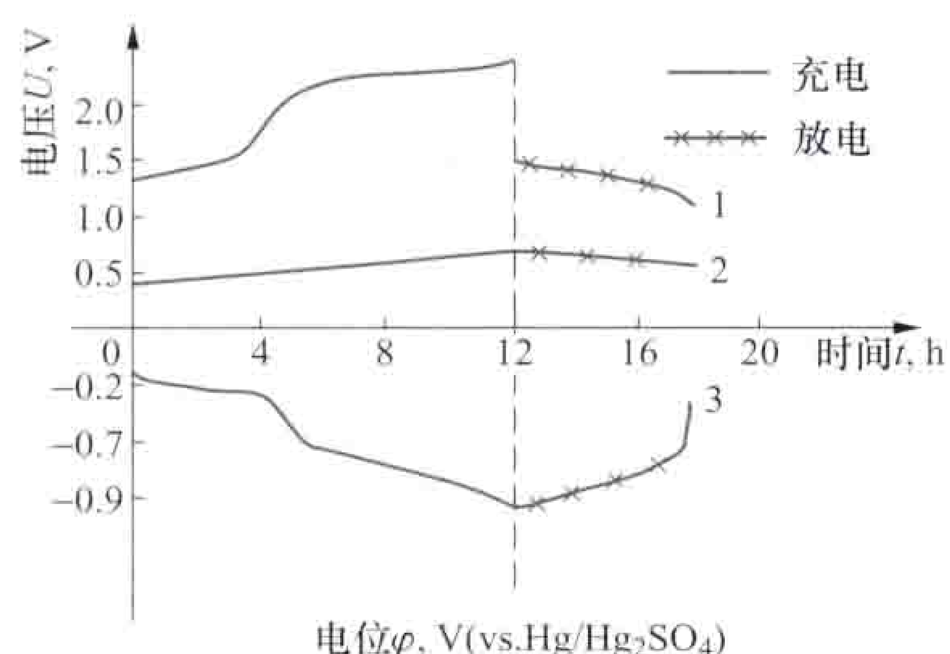


图 2 钒电池充、放电特性曲线（充、放电电流密度 100mA/cm²）

1—电池电压；2—正极活性物质电位；3—负极活性物质电位

功率由电池在给定电流密度下所表现出的电压决定，放电电流的增加会导致电压下降，当反应物被消耗时也会导致电压下降。钒电池的开路电压一般为 1.55（满电）～1.25V（完全放电），电压会随电解液组成发生轻微变化，放电时平均电压为 1.3～1.4V。

电池的电流容量由电极的表面积决定，表面积越大，额定电流越高。在多数钒电池中实际可用的最大电流密度约为 100mA/cm²，电流过大时，在内阻上产生的热量会对电池组件造成损害。

与其他类型蓄电池不同，放电深度不影响液流蓄电池的寿命，钒电池放电深度可以达到 100%，电堆是决定钒电池寿命的关键部件，会随时间发生性能衰减，需要进行更新或更换。电堆内限制寿命的部件为隔膜，会发生老化或破裂，过充则会使电极发生老化。

按照每年 1000 次循环计算，电堆的期望寿命为 10～15 年，泵的期望寿命也应该至少在 10～15 年，通过更换电堆、泵等其他部件，钒电池的期望运行寿命超过 20 年。

特点及应用 因各组成部件独立，液流蓄电池具有布置灵活的优点，但结构相当复杂，需要泵、检测元件及控制单元来支持。液流蓄电池还具有循环寿命长，反应速度快，无需均充，无有害排放，状态易监视，耐过充、过放能力强等优点，但其容量密度相对较低，适用于电网调峰储能电站，配套风力发电和太阳能电池组成供电系统，医院和剧院保安电源，应用于电动汽车时，更换电解液就像汽车加油一样方便。

yiban zhaoming

一般照明 (general lighting) 为照亮整个场所而设置的均匀照明（见照明分类）。一般照明的灯具为均匀分散设置，与室内机器或设备的配置无关。特点是作业面照度均匀，能保证整个工作面都有足够的照度，也能将墙壁和顶棚照亮，使周围环境具有一定的亮度，为整个室内提供良好的视觉环境。

一般照明的灯具布置是按照灯具（见照明器）的配光特性给出最大允许的灯具安装间距 S 和高度 H 之比，简称距高比（S/H），小于这个比值布置灯具，能保证照度的均匀性，使工作面上最大、最小照度与平均照度相比，差值小于 1/6。配置灯具，低矮房间用宽配光灯具，高大房间用窄配光灯具。直接型照明灯具的最大允许距高比和配光的关系如下：宽配光，$S/H=1.5\sim2.5$；中配光，$S/H=0.8\sim1.5$；窄配光，$S/H=0.5\sim1.0$。

一般照明的照度计算通常是采用利用系数法。

按照灯具的安装方法，一般照明可分为明装式照明和建筑化暗装式照明两种。

明装式照明 把灯具装在建筑物的表面上，从顶棚上吊下或吸顶安装的照明方式，见图 1。这种方式顶棚较亮，空间照度高，舒适感好。



图 1 明装式照明

建筑化暗装式照明 把灯具暗装于天棚或墙内，与建筑构造一体化的照明形式。当它作为一般照明方式使用时具有较少的眩光，室内空间的开阔舒畅感好。它的缺点是顶棚较暗，光的利用率较低，维护管理费用较高。发光二极管灯具有体积小、单颗功率低、光效高与寿命长等优点，较适合于建筑化暗装式照明。常见的建筑化暗装式照明主要有光梁照明、隐蔽型照明、嵌入式照明和发光天棚等，如图 2 和图 3 所示。

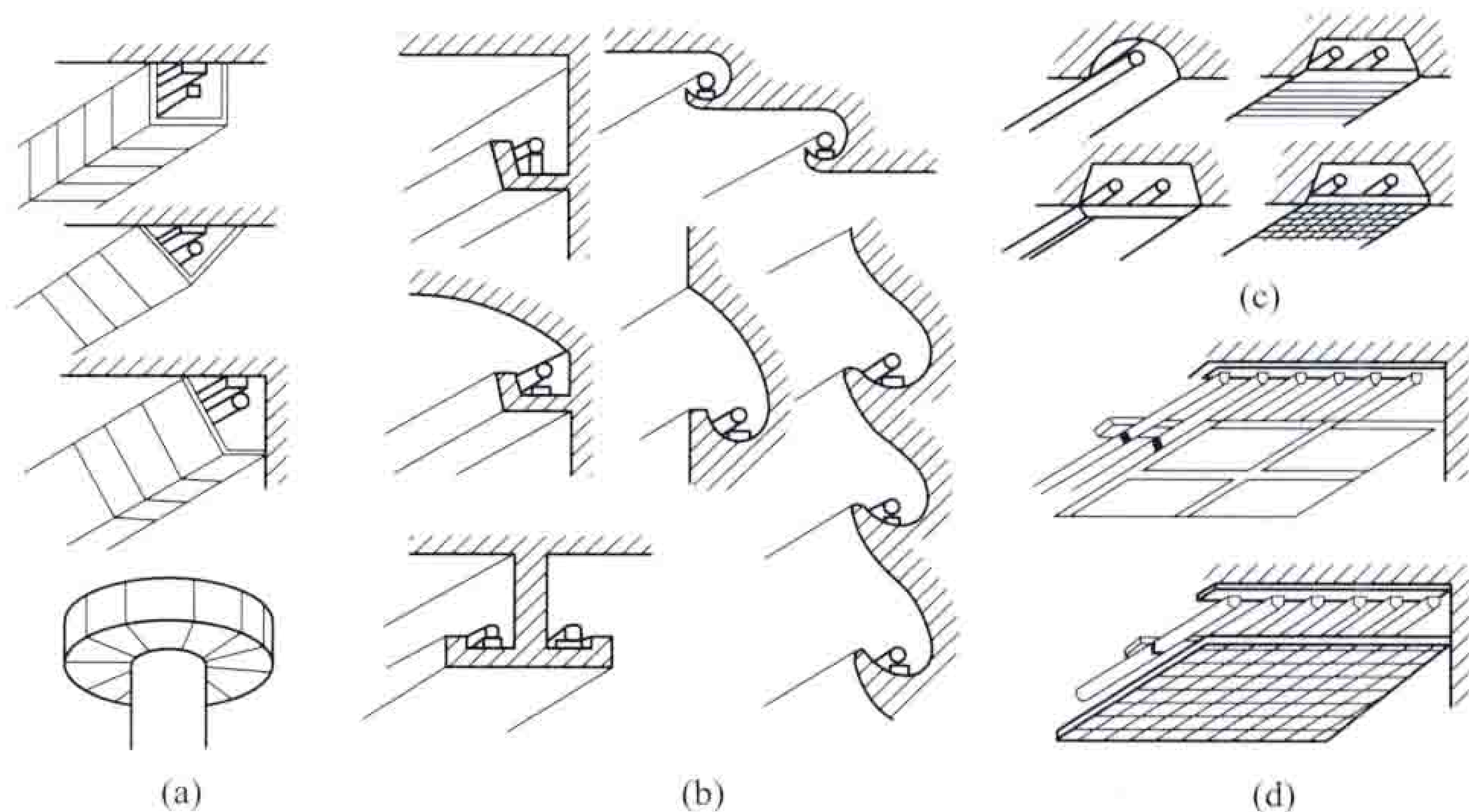


图 2 建筑化暗装式照明

(a) 光梁照明；(b) 隐蔽型照明；(c) 嵌入式照明；(d) 发光天棚

光梁照明 如图 2（a）所示，用扩散性材料制成梁的形式，内装荧光灯。这是早在 20 世纪二三十年代就有的一种照明形式。与嵌入式照明相比，天棚面直接被光照射，发光面对比较小。

隐蔽型照明 又称暗槽灯，是在天棚、墙壁、梁的交接处装设照明灯，见图 2（b）。它属于反射式间接照明，眼睛看不到灯具。这种照明方式的光线分布不易均匀，照明效率较低，但空间舒适感好。

嵌入式照明 将灯具装在顶棚面内，灯下安装扩散板或格栅所形成的照明，见图 2（c）。由于灯具保护角的作用使接近水平的光减少，眩光较少，缺点是发光面与顶棚之间的亮度对比较大。

发光天棚 将光源均匀布置在顶棚上，下面安装有格栅或扩散透光材料所形成的照明，见图 2（d）。格栅式发光天棚的特点是室内照明均匀度高，当视线在保护角之内看天棚

亮度比地面和家具表面亮度低，但是顶棚容易污染，而且如果采用乳白玻璃板式发光天棚又常感到亮度不足。当作业面照度达到1000～2000lx时，荧光灯数量多，顶棚内灯的散热问题较突出。



图3　建筑化暗装式照明示例

yibu diandongji

异步电动机　(asynchronous motor)　见感应电动机。

yinquan diandongji

音圈电动机　(voice-coil motor)　采用音圈绕组进行直线运动或有限角度摆动的电动机。其工作原理和结构形式与扬声器中的音圈相似，故称为音圈电动机。

结构及工作原理　音圈电动机的结构简单，是从扬声器技术演化而来的。如图1所示，音圈电动机主要由磁铁（永久磁铁）、铁芯和线圈组成。其中线圈位于气隙磁场之中，当施加电压于线圈两端产生电流时，根据左手定则，通电导线在磁场中将受到电磁力的作用，随着电流强度及方向的变化，线圈做往复运动，实现电动机动子的直线运动或有限角度摆动，因此线圈也称为动圈。电磁力的大小为

铁芯
S N
S N
线圈
磁铁

图1　音圈电动机结构示意图

$$F=NlBI=K_fI$$

式中 F 为作用于线圈上的电磁力；N 为线圈匝数；l 为每圈导线的长度；B 为磁通密度；I 为线圈电流；K_f 为力系数。

分类　音圈电动机可分为具有长音圈短磁路结构的长音圈电动机和短音圈长磁路结构的短音圈电动机两种。

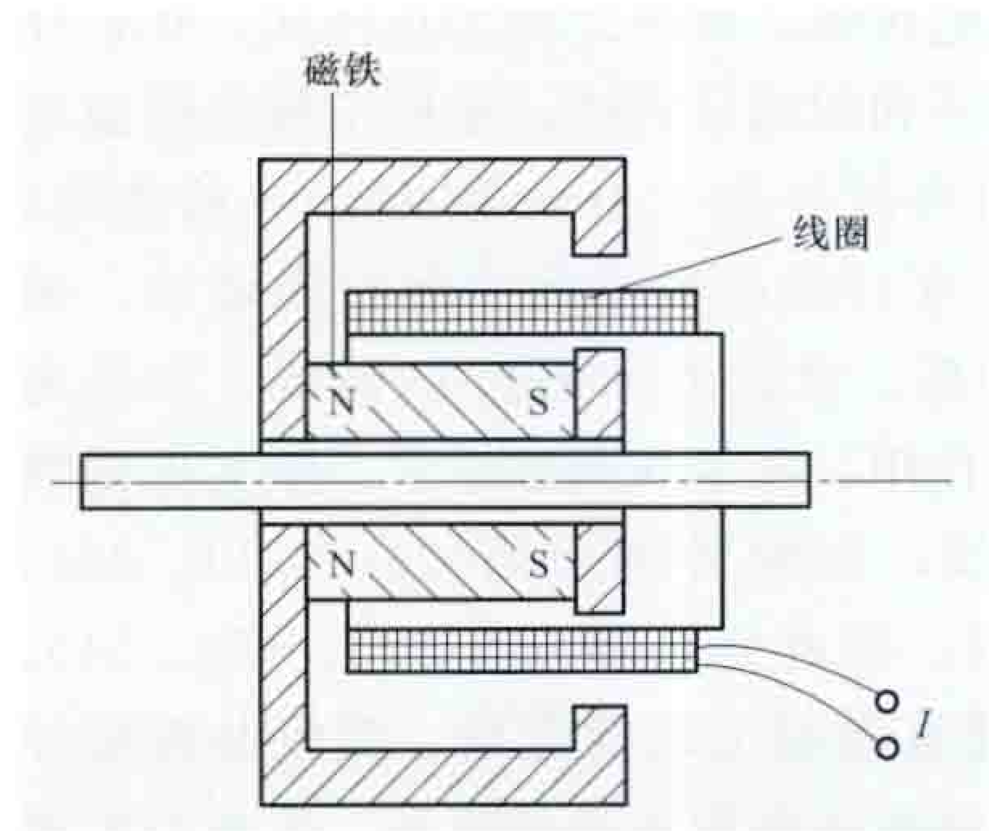


图2　长音圈电动机的典型结构示意图

长音圈电动机　图2为长音圈电动机的典型结构示意图。其中音圈绕组长度大于磁路长度，属于长音圈短磁路结构。长音圈电动机的气隙磁密高、单位体积的比推力（单位位移与推力的比）大，但漏磁大，动作行程内的比推力均匀度差。

短音圈电动机　图3为短音圈电动机的典型结构示意图。其中音圈绕组长度小于磁路长度，属于短音圈长磁路结构。其工作原理与长音圈电动机完全相同。短音圈电动机的动圈始终处于恒定磁场中，比推力均匀度好，漏磁小，但相同比推力的短音圈电动机体积比长音圈电动机大。

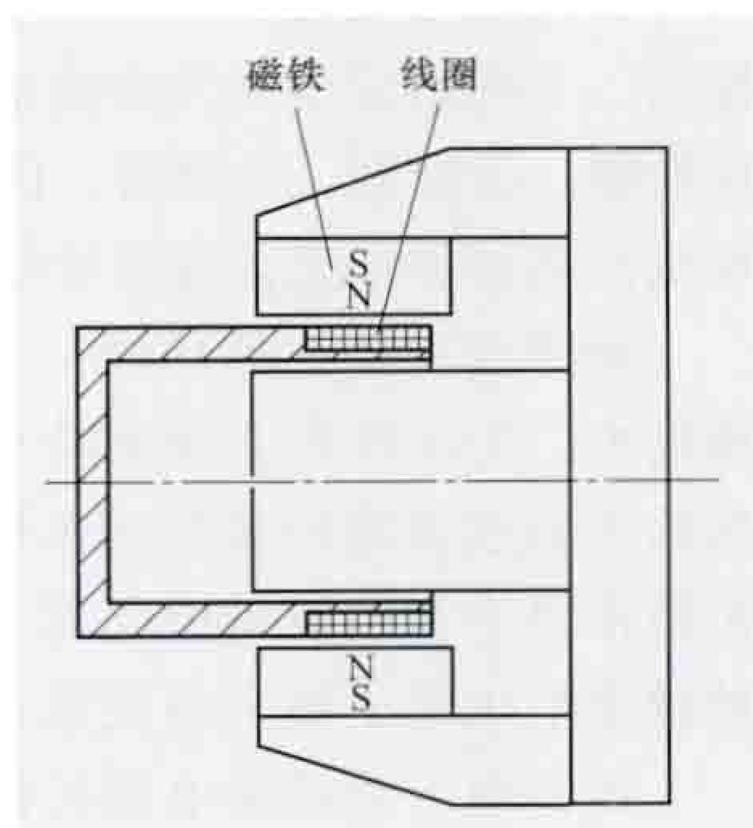


图3　短音圈电动机的典型结构示意图

特点及应用　与传统电动机相比，音圈电动机具有在狭小空间、小行程范围内高推力、高加速度、高动态响应的特点。目前在光学系统镜片控制、半导体制造设备、往复式运动控制阀中具有广泛的应用。

yinxiang shebei

音响设备　(audio equipment)　对声音进行放大、加工和重放的装置。它使用拾音器件（如传声器等）将声音信号转换成电信号，利用调音台对多路电信号进行控制并通过混音器等音频信号处理器对这些信号进行编辑和处理，再经由功率放大器至音箱进行扩音再现；也可以将电信号记录在磁带、唱盘、电影胶片等存储媒介上，需要时利用电唱机、激光唱机等设备进行重放。

发展　音响设备的历史最早可以追溯到19世纪美国发明家T. A. 爱迪生（T. A. Edison，1847—1931）发明留声机。1919年，电子管放大器和电磁式扬声器第一次被用于扩声实验，随后被应用于电声领域。随着电子技术的发展，各种类型的音响设备相继问世，音响设备产业也逐步分解和细化出功率放大器、音箱、传声器等子产业。20世纪70年代以来，电子计算机和激光技术在电声领域中的应用，大大促进了电声学的发展，音响设备产业也日新月异。各种数字音视频编解码及无线网络传输技术在音响设备中大量应用，以MPEG、Dolby技术为代表的数字媒体编解码技术、以HDMI为代表的数字传输技术逐渐成为音响设备系统的必备；数字光盘播放机、激光唱机等数字音频播放设备逐步成为主流；调音台、混音器等控制与音频信号处理设备的应用越来越普遍，功能也越来越完善。随着超高清显示、无损音视频压缩、无线数字传输等技术的发展与应用，音响设备与高清乃至超高清显示设备的结合越来越紧密，视听盛宴逐步进入了寻常百姓家，成为家庭娱乐的重要组成部分。音响设备伴随着大数据时代的来临，其智能化、简约化和个性化将成为市场新的需求热点。

系统组成　音响设备一般由音源、控制设备、音频信号处理器、功率放大器、音箱等组成。

音源即声音来源，用于对声音信号的储存、处理并转换成电信号。在音响设备中，传声器、电唱机、激光机、数字光盘播放器等常作为音源，提供待重放的信号。

控制设备主要用于控制音响设备中的音频输入信号，可

以完成多路输入信号的放大、混合、分配、音质修饰和音响效果加工等操作。音响设备中的模拟调音台、数字调音台、数字音频媒体矩阵等都是常见的控制设备。

音频信号处理器用于对各种音频信号进行调节、混合和输出。常用混音器作为音响设备的音频信号处理器，效果器、均衡器、压限器、分频器、信号分配器、延时器以及数字式系统控制器等各类音频信号处理器也得到了广泛的应用。

功率放大器简称功放，主要用于音响设备中的功率匹配和放大。为了匹配音箱的功率，音源输出的信号一般要经功率放大器或音箱内置的功率放大电路进行功率放大，功率放大器在整个音响设备中起到了组织、协调的枢纽作用，在某种程度上决定了整个系统能否提供良好的音质输出。

音箱用于将音频电能转换成相应的声能并把它辐射到空间去，是整个音响设备系统的终端。音箱性能的好坏将直接影响放音质量和效果。

选购和使用环境　音响设备对使用者有较高的要求，在选购和使用家用音响设备时应注意：①对于音源，应配合预期用途选择无损或保真度较高的设备，同时应考虑音源与后端的配接；控制设备和音频处理器相对较为昂贵，可根据具体需求选购；对于功率放大器，要求其具备匹配的功率输出，应考察其信噪比、失真等性能参数，同时应考虑到其与前端及后端的配接；对于音箱，应覆盖足够的频带宽度，如选用全频音箱，应注意和功率放大器的阻抗与功率匹配，同时根据预期用途对其灵敏度、指向特性、频响特性等性能指标进行考察；对于连接线材，应要求其具备较好的屏蔽特性，且在长时间工作状态下具有较好的稳定性；连接功率放大后的大信号的线材应具有较好的耐功率能力。②对于音响设备所处的听音环境，应确保其无明显的声学缺陷，如混响时间过长或过短等问题；有条件的使用者可以根据音响设备的具体用途有针对性地对听音环境进行建筑声学设计和处理，以使音响设备在此环境下有更杰出的表现。

yingguangdeng

荧光灯　(fluorescent lamp)　利用低压汞蒸气放电产生的紫外线激发涂敷在灯管内壁的荧光粉而发光的器件，又称日光灯。荧光灯是一种热阴极低压气体放电灯，利用放电产生的紫外线，通过激发敷在玻璃管内壁的荧光粉，转换成可见光。

与白炽灯不同的是，荧光灯（见图1）需要附属装置镇流器。荧光灯的发光效率高、寿命长、发热量小、光色可根据需要进行选择、灯管表面亮度低、发光均匀柔和，在普通高度（6m以下）的单层或多层厂房、办公室、学校、医院、图书馆、商店和家庭照明中得到广泛的应用。



图1　各种荧光灯

简史与发展　1938年美国工程师因曼（Inman）在纽约博览会上展出了第一只热阴极荧光放电灯。最初的荧光灯所使用的荧光粉是硫化物，后来使用一些简单的含氧酸盐，如硅酸锌铍、钨酸镁、硼酸镉等。1942年英国首先开发出卤磷酸钙荧光粉，它价格低廉、发光性能稳定、制备工艺简单，使荧光灯的平均发光效率上升到60lm/W，灯的色表和显色特性的选择范围也宽了。1974年，窄频带三基色荧光粉研制成功后，三基色荧光灯的光效提高到90lm/W，一般显色指数达到85以上。虽然三基色荧光粉比卤磷酸盐荧光粉贵，但紫外线转换为可见光的效率高，而且能经受更高强度的紫外线激发，所以灯管的直径可减小1/3，由原来的38mm（T12）降低到26mm（T8），从而可节约荧光粉的用量，在输出光通量不变的情况下，灯的功率可减小10%。1995年，荷兰飞利浦公司又开发出发光效率更高的16mm（T5）管径的直管三基色荧光灯。针对直管荧光灯使用不够灵活的情况，1979年荷兰首先开发出紧凑型荧光灯。这种灯使用三基色荧光粉，显色指数在80以上，灯的寿命长达5000h，灯形小巧，结构紧凑，成为替代白炽灯的一种较理想的节能光源，并在许多照明场所得到推广应用。

结构和材料　管形荧光灯的结构和放电机理如图2所示。灯管的长度和直径是由灯的功率大小确定的。

直管形荧光灯的玻管一般采用碱玻璃制作，环形荧光灯的玻管则采用易于加工的铅玻璃制作。在灯管内壁涂敷荧光粉，灯管两端封接用铅玻璃制成的芯柱，用镍等材料制成的支架，将双螺旋或三螺旋灯丝固定在芯柱上，在灯丝上涂敷电子发射物质（一般是以钡、锶或钙为主体的氧化物）作为电极。根据灯的种类和用途，在电极部分设置辅助电极。灯管经排气抽真空后，封入汞粒和稀有气体。在灯的两端，用焊泥（酚醛树脂、石英砂等）将灯头固定住。灯头的结构是由灯的种类确定的，对快速启动型荧光灯除设有辅助电极外，在灯管内壁还涂敷透明导电薄膜（主要是氧化锡），或是在灯管的内壁或外壁安设用石墨加氧化铝等材料制成的导电带，并在玻管外壁涂敷硅树脂作为防水处理。

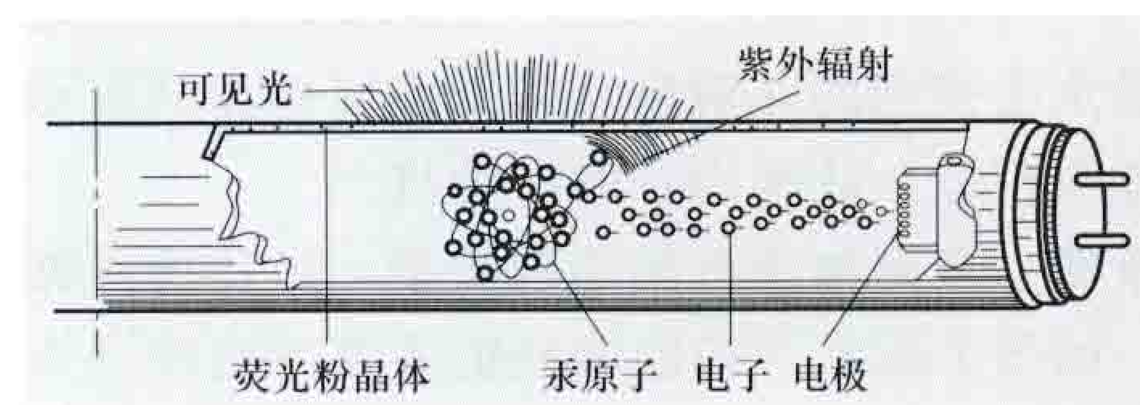


图2　管形荧光灯的结构和放电机理示意图

发光原理　荧光灯的放电形式属于热阴极弧光放电。接通电源后，在进行热电子发射的阴极前面产生阴极电压降，在阳极前面则产生阳极电压降，两极之间为正柱区。在正柱区内，被电场加速的电子和汞原子碰撞，汞原子吸收碰撞电子的动能而被激发辐射出波长为254nm和185nm的谱线，即汞的共振谱线。波长为185nm的谱线多数自我吸收，荧光粉对它的灵敏度也很低。波长为254nm的谱线，在荧光灯的发光中起着主要的作用。在低压汞放电中，除共振谱线外，还产生其他的谱线，在紫外部分有297、313、334、365nm和366nm的谱线，在可见光部分有405、436、546、577～579nm谱线。涂敷在管壁上的荧光粉，吸收共振紫外谱线辐射，发出比共振谱线的波长更长的荧光。荧光的光谱能量分布是随荧光粉材料的不同而变化的。

荧光灯在使用时，不能把灯管直接接到电路上，必须同时连接辅助元件——镇流器。启动时镇流器主线圈电流很小，灯管两端之间电压较高。当阴极在短时间内加热至热电子发射温度，大量电子发射，使灯在高电压下点燃。灯管点燃之后，线路中电流急剧增加，因而镇流器主线圈上的电压降升高，灯管两端电压下降至比较低的工作电压。

荧光灯是一种具有负阻特性的电光源。为了使其稳定工作，必须配用镇流器。电阻、电感和电容器件都可做成镇流器。用电阻镇流所消耗的功率较大，所以大多数情况是采用电感或电容进行镇流。理想的电感或电容器件镇流所消耗的功率比电阻镇流低得多，一般为灯功率的10%～20%，对节约电能，提高灯的光效是很有利的。但是使用电感镇流会使功率因数下降。为克服这一缺点，需在灯的电源侧的两端并联电容器进行补偿，以提高功率因数。补偿后的功率因数可接近1。

为加速荧光灯的启动，在镇流器内附加灯丝加热回路，将镇流器的二次电压设计得高于启动电压，这样电源电压施加后，1s即可启动，这就是荧光灯的快速启动。

电感式镇流器存在质量和体积大，消耗金属材料多，功率因数低的缺点。20世纪90年代开发出的电子镇流器比较好地克服了上述缺点。随着电子工业的发展，电子镇流器将逐步替代电感式镇流器。

技术参数 荧光灯的技术参数主要指发光效率、色温、显色性和寿命。

发光效率 简称光效。以普通36W的白色荧光灯为例，输入功率为36W，转换成可见光只有9W，相当于输入功率的25%，其余27W被荧光粉吸收及加热电极、使管壁温度升高等所消耗，其中11W转化为红外线辐射，16W为传导和对流所消耗。

荧光灯的发光效率等于以下三个分量的乘积：①254nm辐射的发光效率，约占放电功率的60%；②荧光粉的能量转换效率，此效率取决于荧光粉的量子效率、量子比和发光系数；③荧光粉层和玻璃管的透过率，约为0.88。荧光灯的理论发光效率超过110lm/W。

色温 荧光灯色温分为暖色调系列RD（2700K）、RN（3000K），适用于居室、餐厅、宴会厅、多功能厅、酒吧、咖啡厅等场所；中间色调系列RB（3500K）、RL（4000K），适用于教室、办公室、会议室、阅览室、营业厅等场所；冷色调系列RZ（5000K）、RR（6500K），适用于设计室、计算机房和高照度场所。

显色性 荧光灯的显色性是由管壁涂敷的荧光粉决定的。普通卤磷酸钙荧光粉的显色性比较低，显色指数R_a在50～72之间；三基色荧光粉的显色性较高，R_a超过80；超级三基色荧光粉的显色性可达85以上。

寿命 荧光灯的寿命分全寿命和有效寿命两种。全寿命指灯从开始使用到不能再点燃时的总时数；有效寿命指灯的光通量下降到开始使用时初始光通量值的70%时所点燃的时数。

种类 荧光灯的种类很多，分类的方法不一，通常是按外形、灯管尺寸、启动方式、颜色和用途进行分类。

按外形可分为双端荧光灯（直管荧光灯）和单端荧光灯（环形、U形、H形、2D字形荧光灯）两大类，单端荧光灯还包括紧凑型荧光灯和将镇流器组装在光源体内的自镇流紧凑型荧光灯。

按灯管的直径分类，有管径为38mm的T12荧光灯、管径为26mm的T8荧光灯和16mm的T5荧光灯，后两种统称为细管型荧光灯。

按启动方式分类，有预热式启动和快速启动荧光灯两类。

按灯的功率分类，有管壁负荷为0.3W/cm²的标准型荧光灯，管壁负荷约为0.5W/cm²的高功率型荧光灯，管壁负荷大于0.9W/cm²的超高功率型荧光灯3类。

另外，作为装饰照明或其他特殊用途的荧光灯，在荧光粉和玻管内壁之间涂敷一层彩色涂料就可获得各种颜色的彩色荧光灯，用于生物产业，医疗卫生，光化学，检查、鉴别和装饰照明以及色评价，见表。

特殊用途荧光灯及其特征

用途	荧光灯	光谱分布	特　征
生物产业	植物培育用荧光灯	以460nm和660nm为中心的荧光	符合叶面叶绿素的吸光曲线，有效辐射蓝色光和红色光
	捕虫用荧光灯	以360nm为中心的荧光	符合昆虫类的趋光性反应曲线
	防虫用荧光灯	具有450nm以上发光区的黄色灯	不刺激昆虫的飞行或利用昆虫双眼的明适应性，使昆虫向照明场所集中或抑制其夜间活动
医疗卫生	杀菌灯	254nm的紫外线	使用透紫玻璃（透过率约75%以上）
	健康医疗用荧光灯	峰值在300nm附近的荧光	使用特殊透紫玻璃（不透254nm以下），具有红斑作用和维生素D合成作用
光化学	复印用（重氮）荧光灯	以420nm为中心的荧光	与使用机器组合，有各种尺寸的灯和多种超高输出型的灯
	电子照相用荧光灯	510nm附近的荧光	缝隙式
	光化学用荧光灯（黑光灯）	以370nm为中心的荧光	光化学反应用（有机合成等），紫外线硬化树脂用
检查、鉴别、装饰照明	黑光灯（亦称为蓝色黑光灯）	以360nm为中心的荧光	使用特殊着色玻璃，完全截住可见光，仅辐射近紫外光（300～420nm）
色评价	色评价用荧光灯	色温为5000K的高显色性	R_a>95抑制亮谱线

yingye guanli

营业管理 (business management) 为实现电力销售目标进行的控制活动。营业管理是电力营销的重要工作内容，在将电能产品送达到用户消费场所的过程中，构成多工序紧密联系的生产线。营业管理的过程与结果，体现了国家供用电政策和供电企业服务品质，其中任何一个环节的失误，都可能造成用户利益的损害或供电企业的损失。

世界各国营业管理的内容与方式基本相似，但因经济体制、发展水平的不同而有所差异。中国营业管理主要有业扩报装管理、合同管理、电能计量管理、电费管理和供电服务等方面。

业扩报装管理 解决用户新装或增容用电并办理用户变更用电事宜，也称报装接电。业扩报装一般按用户用电容量的大小和供电电压等级的高低实行分级管理。从受理用户的用电申请开始，直至为用户装表接电为止的各项工作内容，包括受理用户新增或增加用电的申请以及用户变更用电日常业务，组织现场勘查，确立供电方案，进行供电工程设计、施工、验收，签订供用电合同，安装电能计量装置，接电等。业扩报装管理承担着扩大电力经营业务和日常销售服务工作，是直接为用户服务的窗口。因此，世界各国电力公司非常重视此项工作，尽力在用户希望开始用电的日期前供电。

合同管理 为保证依法进行供用电合同的订立和履行为目的的活动。世界各国电力公司都特别重视供用电合同的订立、履行和管理，在供用电规则中，对供用电合同的订立、变更、解除、终止、违约责任、合同期限等都有明确的规定，这也是电力营销工作遵循的依据。营业管理贯穿合同签订与履行的全过程，根据合同类型设有专人进行管理。从用户办理用电申请开始，到供用电合同订立并对用户正式供电，或发生合同变更或解除，一般需要进行以下工作：根据用户需要和供电企业的可供能力，双方确定合同内容和各项条款；建立合同的文本及相应的合同编号、签约人、签约时间档案；检查跟踪合同的履行情况；到期合同的续签；合同的变更或解除处理等。

电费管理 按照国家规定对抄录电能表、核算电费、收缴电费工作进行的控制活动。电费管理工作的业务量大，作业单一且周期性重复，直接影响供用电双方的经济利益。电费管理主要承担抄表、核算、收费和统计分析工作，对及时性和准确性的要求较高。其主要工作内容包括：定期正确地抄录用户的用电量，按照合同约定的容量和国家规定的电价准确地计算和审核应收电费，及时全部回收和上缴电费，并完成对各行各业的用电量及其构成、应实收电费及平均电价等销售情况的统计分析。

电能计量管理 以保证电能交易的准确、可靠为目标的基本活动。电能是以专用计量器具进行计量的特殊商品，世界各国都把贸易结算的电能计量器具作为由国家进行监督的计量器具之一，供电企业必须接受国家量值标准的传递，并依法对电能计量装置进行管理。电能计量管理的主要内容有计量点管理、计量资产管理、计量体系管理、计量装置管理，包括确定合理的电能计量方式，选择合适的电能计量装置及安装地点，电能表的检验，计费电能表及其附件的购置、安装、移动、更换、校验、拆除、加封、启封及表计连线，处理各种原因造成的计量不准问题等。

供电服务 为满足电力消费者需求而进行的活动。电力销售离不开供电服务，供电服务又推动了电力销售业务的发展。各国电力企业在营业管理中都十分注意改善和提高供电服务质量，以提供方便、快捷的供电服务为目标，不断扩大服务功能。中国的供电服务意识和服务水平，是在社会主义市场经济体制逐步建立的过程中不断得到发展和提高的。2001年以来，设立了24小时的供电服务热线，开通了供电服务网站，提供电力故障报修、政策及业务咨询和电费查询、业务受理和缴纳电费、投诉举报等服务项目，许多地区还为孤寡老人提供特殊服务。供电服务内容、服务项目、服务渠道、服务对象和服务标准都不断得到充实和完善，在提高供电服务水平的同时，扩大和提高了电力营销能力。图示为江西省电力公司供电服务中心。（见供电服务标准、供电服务渠道、供电服务项目）



江西省电力公司供电服务中心

营业管理举例 日本和法国的营业管理均具有一定的特色。

日本的营业管理 日本的营业管理组织分为总公司、支店和支社三个层级。以东京电力公司为例，总公司下设10个支店、45个支社。总公司负责编制有关营业活动的方针、计划，开展供电条款及供需调整合同的运作，开展售电绩效管理，并对大客户开展各项营销活动。支店作为总公司下属的分支机构，在总公司制定的方针下，根据所辖区域的实际特点，开展自主经营。支店主要对所辖区域的经济、社会、自然环境变化及客户的生活方式、用电需求等内容开展市场调查，制订中长期的业务计划及售电计划。同时，支店还对大规模开发项目及特别高压供电客户开展信息收集、售电提案等活动。支社是直接面对客户开展各种业务的基层营业组织，主要负责办理用电申请、售电营业活动、上门服务（拆迁作业、室内线路停电作业等）、技术咨询、抄表收费及配电、送电、变电设备的设计、运维、施工等。

法国的营业管理 法国电力公司的营业管理也是按用户供电电压等级的高低不同，实行分部门或分级管理。法国电力公司直属的业务处负责研究不同类型用户的营销方针，制定电价政策，提出扩展用电的规划和目标。法国电力公司下属的发输电局，负责60kV高压用户营业管理，并与送受电有关的相邻国家签订供受电合同；20kV及以下的中压和低压用户由法国电力公司下属的配电总局负责管理。配电总局

在全法国设立了 17 个配电局，配电局下设 95 个配电中心，配电中心下设 300 个配电所，配电所下设 1000 个配电站，营业管理的大量工作主要集中在配电中心、配电所和配电站。法国的营业管理也包括报装接电、电能计量管理、电费管理等方面，并十分注意改善服务和提高效益。在接待用户上，主要以信函和电话的方式办理用电业务，在查询并解答用户的咨询问题上，主要通过网络或计算机系统进行处理。在电费管理方面，由电力企业、政府共同设立的能源互助基金承担对社会弱势群体的“保电”服务，大幅降低约 50% 的停电次数。在抄表及付费方面，对居民及容量不大于 36kV·A 的商业客户，采用每年 2 次抄表，超过 90%的客户通过自动转账和集中结算的方法付费。在负荷管理方面，在供用电合同中不仅要明确用电最大需量，而且要规定各电价时间所对应的负荷以及超负荷与变更负荷责任与办法；对低压用户要按报装容量安装调整好低压负荷开关，防止用户超用电力；对实行峰谷分时电价的用户以及允许后夜低谷用电热水器等的负荷，采用音频控制技术加以严格控制。法国的电价并不复杂，但电价执行的制度相当具体。这些措施，充分反映了法国电力公司在满足用户电力需求的条件下，公平对待用户，合法追求更大效益的宗旨。

yingji zhaoming

应急照明 （emergency lighting） 在正常照明因电源失效而熄灭的情况下，供人员疏散、保障安全或继续工作用的电气照明（见照明分类）。应急照明是现代建筑中的一项重要的安全设施，要求使用能迅速点燃的灯泡，如白炽灯、卤钨灯、荧光灯、发光二极管灯等，高强气体放电灯因启动时间较长不能作为应急照明光源。

分类 应急照明按功能分为疏散照明、安全照明、备用照明三类。

疏散照明 在正常照明因电源失效或因灾害熄灭时，为了在紧急情况下能安全撤离，确保疏散走道能得到有效的辨认和使用而设置的应急照明。疏散照明的设置应根据建筑的层数、规模大小、复杂程度，建筑物内停留和流动人员多少，以及这些人对建筑物的熟悉程度，建筑物内的生产或使用特点、火灾危险程度等多种因素综合确定。

应用场所包括：①疏散距离超过 25m 的所有公共建筑，如办公建筑、旅馆饭店、会堂、影剧院、体育场馆、博展建筑、商场超市、交通建筑、科研院校及医院等；②所有高层建筑（含建筑高度超过 24m 的居住建筑）；③疏散距离超过 25m 的所有地下建筑，如人防设施、地下铁道车站、地下车库和地下娱乐场等；④大面积无天然采光的建筑；⑤特别重要的、人员众多的大型工业厂房。

疏散照明灯具的设置应使下列地点的照度高于其周边区域的照度：①紧急情况下使用的每个出口；②靠近楼梯或台阶处，保证每个楼梯、每一步台阶可以被直接照射；③指定的紧急出口和安全标志；④疏散路线中每个行进方向改变处；⑤每个内连走廊的连接处；⑥最后一个安全出口的外面及其附近区域；⑦每个灭火器具和报警按钮处。

疏散照明用灯具按照点灯状态分类，有平时不点燃的和减光型疏散照明灯；按照灯的构造分类，有普通型、防水型、防尘型、防爆型疏散照明灯；按照电源设置方式分类，有内置电源型和电源别置型疏散照明灯。

疏散照明灯的颜色由绿色和白色组合而成，如图 1 和图 2 所示。安全出口疏散标志灯的人物形状为绿色，箭头为白色；走廊通道、室内通道疏散照明灯的标志为绿色；楼梯通道疏散照明灯为不带任何标志的普通灯具，仅供电电源与普通灯具有别。



图 1 安全出口疏散标志灯



图 2 通道疏散标志灯

应急疏散标志包括指示出口、疏散路径和安全区域的标志，疏散路线中指示方向的标志，显示当前区域的标志，指示救生器具和灭火器具存放位置的标志以及为视力残疾人士设置的发声型指示标志等。

随着照明技术的发展，大量灯光型应急标志采用 LED（发光二极管灯）作为光源已成趋势，频闪型 LED 应急标志灯的推广使用也日益广泛。该种应急标志灯在正常时为恒定光，当灾害发生后，通过信号控制发出频率不低于 1Hz 的闪烁光，极大提高了应急标志的醒目程度。

疏散照明系统的控制应用技术有电源监测、系统巡检、导向控制等，不仅可以有效地监测供电电源的状态和系统中各器件的运行状态，同时为避免或减少疏散人群在大型公共建筑物中面对多条疏散路线并存引起的困惑和迟滞，可以灵活地改变部分原有的指示方向，明确地指引建筑物中央的疏散人群有秩序地沿安全疏散路线到达安全区域。

安全照明 在正常照明因电源失效而熄灭时，为确保处于潜在危险中的人员的安全而设置的应急照明。安全照明的照度应不小于该场所一般照明照度的 5%～10%，对于特别危险的作业场所，其照度还应提高，如医院危重患者抢救室的安全照明照度不宜低于正常照明照度的 50%，而手术台安全照明照度应与正常照明照度相同。下列场所应设置安全照明：

（1）工业厂房中的正常照明因电源故障而熄灭时，在黑暗中可能造成人员挫伤、灼伤等严重危险的区域，如安装有裸露刀具而无保护措施的圆盘锯的厂房等。

（2）部分体育比赛的正常照明因电源故障而熄灭时，在黑暗中可能造成正处于运动过程中的运动员摔伤的场所，如跳水比赛馆、体操和蹦床比赛馆等。

（3）正常照明因电源故障熄灭时，使危重患者的抢救工作不能及时进行，延误急救时间而可能危及患者生命的场所，如医院的手术室、危重患者的抢救室等。

（4）正常照明因电源故障而熄灭后，由于众多人员聚集，且不熟悉环境条件，容易引起惊恐而可能导致人身伤亡的场所，或人们难以与外界联系的电梯内。

备用照明 在正常照明因电源失效而熄灭时，为确保正常活动继续进行而设置的应急照明。一般场所备用照明的照度应不低于正常照明照度的 10%。为满足特殊要求也可能需要更高的照度，应根据具体生产工作条件来确定，如消防控制室、消防泵房、应急发电机室、配电室等与消防工作直接有关的场所，其备用照明的照度不宜低于正常照明照度的 50%。重要公共建筑，如国家和国际会议中心、重要比赛场馆和交通枢纽等场所的备用照明，其照度不宜低于正常照明

照度标准值的下限。设置备用照明可防止因正常照明熄灭后所引发的事故，因此下列场所应设置备用照明。

（1）断电后不进行及时的操作或处置可能造成爆炸、火灾及中毒等事故的场所，如制氢，油漆生产，化工、石油、塑料及其制品生产，炸药生产及溶剂生产的某些操作部位。

（2）断电后不进行及时操作或处置将造成生产流程混乱或加工处理的贵重部件损坏的场所，如化工、石油工业的某些流程，冶金、航空航天等工业的炼钢炉、金属熔化浇铸、热处理及精密加工车间的某些部位。

（3）照明熄灭时将造成较大政治经济损失的场所，如重要的通信中心、广播电台和电视台、发电厂与中心变电站、控制中心、国家和国际会议中心、重要旅馆、候机楼、交通枢纽、重要的动力供应站（供热、供气、供油）及供水设施等。

（4）照明熄灭将妨碍消防救援工作进行的场所，如消防控制室、消防泵房、应急发电机房、广播通信机房及配电室等。消防应急照明灯见图3。



图3 消防应急照明灯

（5）因照明熄灭将无法工作和活动重要的地下建筑，如地下铁道车站、地下医院、大中型地下商场、地下旅馆、地下餐厅、地下车库与地下娱乐场所等。

（6）照明熄灭将造成现金、贵重物品被窃的场所，如大中型商场的贵重物品售货区、收款台及银行出纳台等。

应急照明的供电 应急照明应按一级负荷（见用电负荷级别）供电条件供电，设置专用的备用电源或备用供电线路。由正常电源转换到应急电源的时间希望越短越好，国际照明委员会（CIE）规定安全照明的电源转换时间不大于0.5s；疏散照明不大于5s；备用照明不大于5s，金融商业交易场所的备用照明不大于1.5s。

内置电源型应急照明灯的蓄电池组供电时间不应小于30min，持续时间可分为30、60、90、120、180min几种。疏散照明应能持续到确保全部人员撤到安全地点。

别置电源型应急照明灯的电源常用的有应急供电蓄电池组和柴油发电机，如持续时间要求较短的可采用应急供电蓄电池组（EPS），持续时间要求较长的应采用自备发电机供电，在取得有关部门允许时也可采用电网作为供电的第二电源。

当采用备用发电机作为应急照明备用电源时，正常供电故障发生后由于机组起动时间较长，有可能不满足电源转换时间的要求。此时应设置其他过渡应急电源，如蓄电池组（EPS）或采用灯内自带电池的应急灯。

应急照明的维护管理十分重要，需要制定维护制度，以免灾害发生时不能正常工作酿成大祸而造成重大损失。集中供电蓄电池组每月至少运行1h；自带电池应急灯每月应检查和操作1次，每年应运行2次，每次1h；蓄电池每隔3年应长时间放电1次；发电机组至少90天检验和测试1次。

yongci tongbu diandongji

永磁同步电动机 （permanent-magnet synchronous motor） 利用永磁体建立励磁磁场的同步电动机。由于没有励磁绕组、电刷和集电环，因此永磁同步电动机比同容量电流励磁同步电动机的结构简单、体积小、效率高、运行可靠、维护方便。对功率较大的永磁同步电动机，还可省去励磁电源柜。永磁同步电动机因难以调节励磁磁场来改变其功率因数和无功功率，而需从其他方面采取措施。

工作原理　永磁同步电动机按照反电动势波形可分为正弦波永磁同步电动机和方波永磁同步电动机。由于转子磁钢几何形状的不同以及定子绕组形式的不同，使得当转子旋转时，在定子上产生的反电动势波形有两种不同形式：一种为正弦波；另一种为梯形波（方波）。两种同步电动机在原理、模型及控制方法上有所不同。正弦波永磁同步电动机一般采用正弦波电压电流驱动，控制策略采用恒压频比方法或矢量控制方法，习惯上把正弦波永磁同步电动机组成的调速系统称为正弦型永磁同步电动机（PMSM）调速系统，或简称为永磁同步电动机调速系统；而由梯形波（方波）永磁同步电动机组成的调速系统，其驱动器中采用电力电子开关替代一般直流电动机中的机械换向器，可等效为一台没有机械换向器的直流电动机，在原理和控制方法上基本与直流电动机调速系统类似，故称这种系统为无刷直流电动机（BLDCM）调速系统，这种同步电动机又称为无刷直流电动机（或方波电动机）。

结构　永磁同步电动机结构形式的不同主要体现在转子结构上，这也是它与其他电动机最主要的区别。其转子磁路结构一般可分为表面式、内置式和爪极式3种。①表面式永磁同步电动机。将瓦片状的永磁体置于转子铁芯外表面，产生径向磁场。它制造工艺简单、成本低，但转子表面无法安放起动绕组。常用的稀土永磁材料相对回复磁导率接近于空气，所以这种电动机的直、交轴电感基本相等（$L_d=L_q$）。②内置式永磁同步电动机。永磁体位于转子内部，永磁体外表面与气隙周围之间有铁磁材料制成的极靴，极靴中可以放置阻尼绕组。由于直轴磁路中有磁导率较低的永磁体，因此内置式永磁同步电动机的直轴电感通常小于交轴电感（$L_d<L_q$），使转矩功角特性曲线上最大转矩所对应的功角大于90°，而不是像电流励磁凸极同步电动机那样小于90°。内置式永磁同步电动机广泛用于要求有异步起动能力或动态性能高的场合。③爪极式永磁同步电动机。转子结构通常由两组铁磁爪极和一个圆环形轴向充磁的永磁体构成，两组爪极互相错开，并分别在圆周均匀分布，从而形成N、S极交替排列的磁极。爪极式永磁同步电动机性能指标较低，但结构和工艺较简单。

分类　永磁同步电动机按照起动方式可分为自起动、异步起动、磁滞起动永磁同步电动机三类。①自起动永磁同步电动机。它有自起动能力，通常输入功率在10W以下、极数较多（4对极以上）、转子转动惯量很小，常附加齿轮减速机构制成低速电动机。它的转向一般是不定的，在需要定向的场合可设计成自定向自起动永磁电动机。自起动永磁同步电动机品种规格多、制造成本低，常用于恒速驱动或各种无恒速要求的驱动场合。②异步起动永磁同步电动机。永磁体采用内置式结构，转子上装有用于异步起动的阻尼绕

组。③磁滞起动永磁同步电动机。转子表面加有磁滞层，可看成是由一台磁滞电动机和一台转子无阻尼绕组的永磁同步电动机组合而成，它兼有后者力能指标高和前者能自起动的优点。

应用　永磁同步电动机配以静止变频器可用作调速电动机。其转速与电源频率保持固定的关系，可直接用于开环变频调速系统，尤其适用于由同一台变频器供电的多台电动机要求准确同步的传动系统。又因它有较高的效率和功率因数，故可减小变频器容量，降低成本。变频器供电的永磁同步电动机加上转子位置闭环控制可构成自同步永磁电动机。自同步永磁电动机既具有与电流励磁直流电动机一样的优良调速性能，又没有电刷，广泛应用于要求高控制精度和高可靠性的场合。

数字化控制的永磁同步电动机矢量控制系统在高性能伺服驱动领域已占据垄断地位，低成本的无刷直流电动机控制系统在电冰箱、空调器等家用电器中获得了广泛的应用，随着永磁同步电动机功率向兆瓦级别的拓展，在机车牵引、舰船推进等大功率电力拖动领域也将获得越来越多的应用。永磁同步电动机外形见图。



永磁同步电动机

yongci zhiliu diandongji

永磁直流电动机　(permanent-magnet direct current motor)　利用永磁体建立励磁磁场的直流电动机。其磁极全部用永磁材料或永磁材料加上铁磁材料制成，所以没有励磁损耗，也不需要独立的励磁电源。与采用电流励磁的直流电动机相比，永磁直流电动机的结构工艺简单、体积小、效率高、用铜量少，但在运行中其励磁磁通势和磁通量难以调节。永磁直流电动机的各种特性与他励、并励直流电动机相似。因永磁体的磁导小，所以稳态运行时的电枢反应可忽略不计，其机械特性更硬、更接近直线。用高矫顽力永磁材料（如铁氧体、稀土永磁材料等）制成的永磁直流电动机还具有换向性能好的优点。小功率永磁直流电动机具有下垂的机械特性、线性的调节特性和较快的响应速度、较宽的调速范围，因而便于控制。永磁直流电动机广泛应用于从家用电器到要求有良好动态性能的精密速度和位置传动系统中，配上稳速器还可用于要求转速恒定的场合。

永磁直流电动机性能的稳定有赖于永磁体性能的稳定，因此永磁直流电动机在出厂前往往需要进行磁稳定处理。若电动机运行中永磁体遭受了超出允许的去磁作用而产生不可逆的去磁时，可通过永磁体重新充磁及磁稳定处理，使电动机性能恢复。

随着稀土永磁材料的发展，特别是钕铁硼永磁材料的开发和应用，使得永磁直流电动机的体积减小、造价降低，且基本不产生退磁现象，促使永磁直流电动机向中、大功率方向发展。由于钕铁硼永磁材料的温度系数较大，使电动机性能易随永磁体温度发生变化，因此，其最高温度一般限制在120℃以内。

为了减小永磁直流电动机的转动惯量，可以采用以下三种方法：①制成盘式电枢电动机。它是一种有轴向气隙和无铁芯的盘状电枢永磁直流电动机，又可分为印制绕组直流电动机和线绕盘式直流电动机两类。印制绕组直流电动机的电枢是一块机械强度很高的绝缘盘，用化学腐蚀法或铜箔冲制法在其上制成平面绕组。线绕盘式直流电动机的电枢是由导线排列成盘状，经树脂注射或模压成型处理而构成的，其耐热性、力学性能和电气性能都较好。②制成杯型转子印刷电动机。电枢绕组被做成杯型圆环，夹在内外两个定子之间。③制成无槽直流电动机。其转子是一个光滑无槽的圆柱形铁芯，上面安放着由绝缘带和树脂成型和固定的电枢绕组。这三种直流电动机的共同特点是：转动惯量小，过载能力达到5～10倍，电枢绕组电感小，换向性能比较好。

yongdian

用电　(electric power utilization)　按预定目的使用电能的行为。社会上应用的电能，是由水、煤、油、核等一次能源加工转换得来的，送到用户后又借助能量转换器具转换为机械能、热能、化学能、光能，以满足社会政治、经济、文化和人民生活的需要。只要有人活动的场所，就有电的市场，充足、优质、廉价的电能是市场的需要，也是电力行业的目标。

电能与其他商品一样，有使用价值，也具有商品属性。它是一种最方便、最清洁、最容易输送和控制，并能以简单的装置高效地转换为其他能源的二次能源。电能的应用是继钻木取火和蒸汽机应用后，人类历史上利用能源的第三次飞跃。在人类社会生产史上，蒸汽机曾为社会生产由劳动密集型向能源密集型过渡起了先导作用；电能的应用推动了能源密集型生产的发展，开展了社会生产进入技术密集型的时代，创造出空前规模的社会生产力；电能的应用与电子技术控制手段相结合，为社会生产的技术进步、社会劳动生产率的提高和劳动生活条件的改善，提供了广阔的发展前景。当今社会，电气化程度已成为衡量一个国家工业、农业、科学技术、国防现代化和居民生活水平的重要标志。

受社会经济发展的不平衡，以及电能的发电、供电、用电在瞬间同时完成、不能大量贮存、行业用电负荷随时间变化各有特点等客观规律影响，电力供需平衡关系随时间和季节而异，一天之内短时间缺电，一年之内季节性缺电，一个较长时期的大面积缺电，在世界多数国家都曾有发生。采用分时或分季节的不同电价等经济手段和实行配额供电等政府行政干预，是世界各国通用的缓解电力供应不足的办法。

电能的价值随社会的发展而提升。传统的一次能源资源逐渐枯竭，开发条件日益恶化，一次能源开发所投入的社会平均必要劳动量日益增加，这部分递增的劳动价值，通过科技进步不断提高能源的二次转换效率，抑制了电能成本的上升；同时，极大地提高了用能终端的能源综合利用效率，使用电能通常比直接使用一次能源更为经济合理。

简史　电作为能源走进社会是从弧光灯和发电机的发明并逐步实用开始的。19世纪初，弧光灯试制成功。1831年英国人M. 法拉第（M. Faraday，1791—1867）发现电磁感应现象，他的试验模型可以认为是直流电动机的雏形，次年出现了原始的直流发电机，为电能的应用打下了基础。19

世纪 50 年代，以上两项发明经过许多人的改进，应用在航海灯塔上。1870 年前后，直流发电机达到了实用化程度，为弧光灯的应用开辟了道路。1873 年的维也纳万国博览会上展出了一台用蒸汽机拖动的发电机，向 1km 外的一台原动机供电，带动一台水泵运转，这是电能开始在动力上应用的前奏。1875 年法国巴黎北火车站开始用弧光灯照明，世人多以此作为社会用电的开始。由于弧光灯的光亮过强，且产生的碳蒸汽污染空气，故只能用于广场照明，而不宜用于室内。1879 年美国人 T. A. 爱迪生（T. A. Edison，1847—1931）研制出碳素白炽灯泡后，以电为能源的照明才开始用于室内并在社会上推广应用。

19 世纪 70 年代末，即使是范围很小的直流电进入城市街道，应用电能也比应用一次能源优越，电能在各领域的应用，已受到科学家的重视。首先，1879 年 5 月直流电动机应用在德国的世界第一条城市公共电车上，接着以直流电为动能、热能、化学能的应用技术有了进展。在 19 世纪 80 年代，铝、镁、铜、锌的电解提取和直流电弧炉的金属冶炼，都已试验成功。90 年代，电解制碱、各种电阻炉、效率更高的钨丝白炽灯问世。由于直流电受发电机电压限制，送电距离有限，变压器、交流发电机、电动机都已问世后，输电方式从单相交流发展为三相交流输电，交流送电线路的建设成功使输电距离大幅度增加，为电能的应用和远距离输送开辟了道路。20 世纪初，水电解提取氢、氧以及合成氨制取技术也达到了工业化生产水平，为电能的更加普遍应用创造了技术条件。

第一次世界大战（1914～1918 年）期间，军事工业的发展，促进了工业装备的更新和新科学技术的应用，电力拖动逐步取代了蒸汽透平拖动。电解烧碱、电冶炼金属、电石以及化肥等工业的兴起和发展，使电能在转化为化学能、热能应用领域上迈出了一大步，扩大了电能应用范围。

中国于 1879 年 5 月在上海英租界的一幢仓库里，以 1 台 10hp（7.46kW）蒸汽机拖动的发电机点燃第一盏碳极弧光灯。1882 年英国人在上海成立上海电气公司并建设了容量为 12kW 的中国第一家电厂，供应沿外滩到虹口招商局码头串接的 15 盏电弧灯，见图 1。1883 年 5 月，上海电气公司在百老汇立杆放线，办理用户报装用电业务。此后，在广州、北京和其他一些沿海口岸、矿山、商业区陆续兴建了一批公用和企业自备发电厂，此时的公用发电厂主要供商业、居民照明和市政路灯、电车等用电。在 20 世纪 30 年代前后，中国的电力公司才开始逐渐向附近的工业企业和乡村农田灌溉、碾米加工等供电。

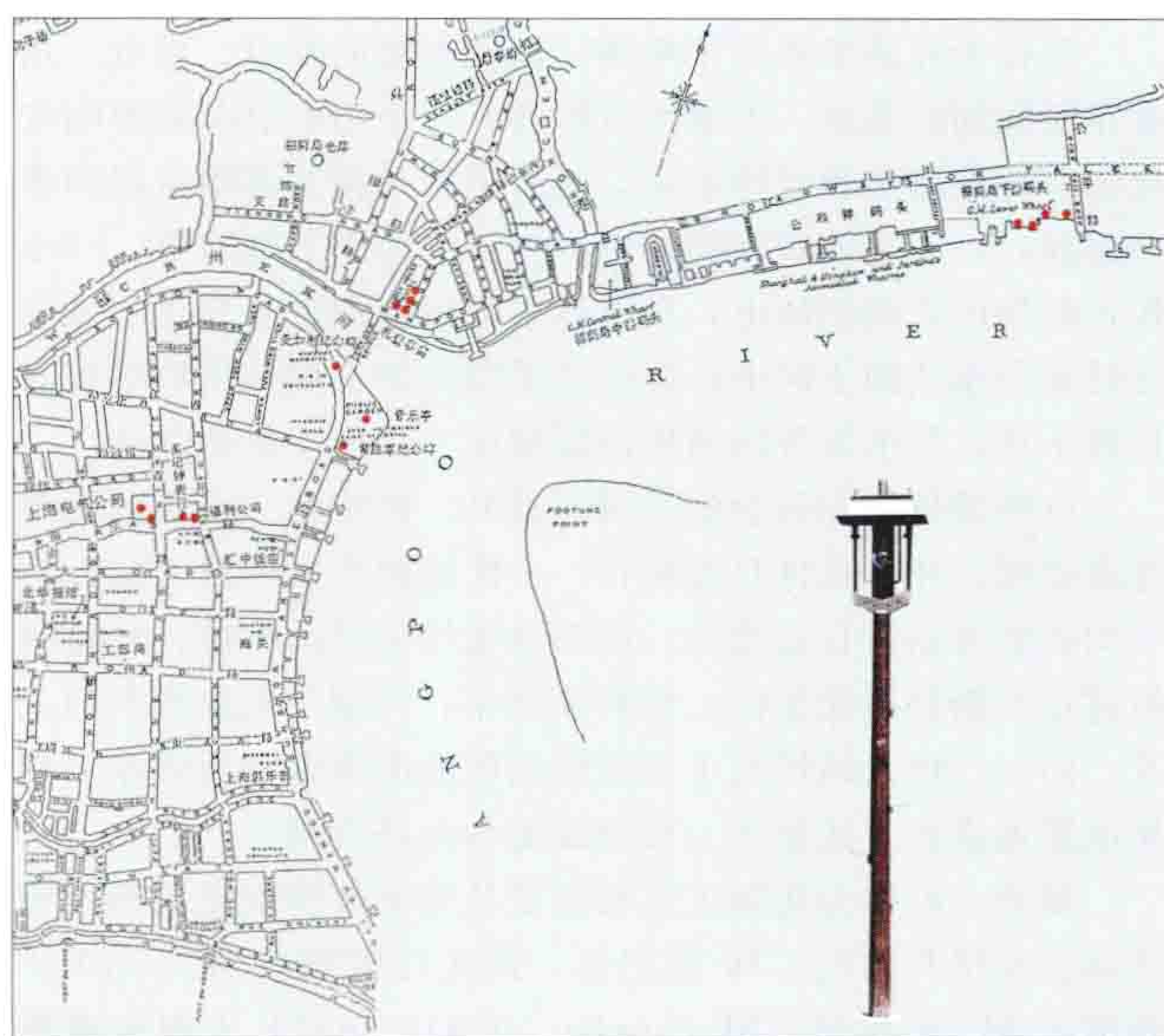


图 1　1882 年 7 月 26 日晚 7 时上海 15 盏弧光灯点亮位置示意图（图中 • 处）

电能应用　电能使用方便，安全、清洁、廉价，决定了电能应用的前景十分广阔。但电能应用范围取决于用电技术和用电设备的开发和商品化速度。电气照明器具的发明及技术进步，已基本垄断了太阳光以外的照明领域；电动机的出现，使电力拖动成为社会的主要动力来源，并为生产工艺上的自动化、远动化创造了条件；各种电加热炉窑的出现，不但提高了能源利用效率，而且解决了其他冶炼方式无法达到的高温和特殊气氛冶炼条件，提供了金属热处理加工特殊工艺环境；电焊的发明和技术进步，解决了其他焊接方式无法解决的焊接质量和难熔金属的焊接问题；用电解方法加工提纯金属取得了多种具有空前纯度的有色金属，满足了对其应用质量的要求，食盐电解制出了为国民经济发展需要而过去无法取得的重要工业原材料；电气化铁路的应用解决了陆地运输上的高速度、大运力、高陡度、无污染的运输手段，已取代蒸汽、内燃机车；各种家用电器的发明和技术进步，为人们学习、生活和工作的环境，饮食卫生，居住安全和舒适，仪表美观，文化生活的丰富等创造出空前优越的条件；通信、广播、影视等也都离不开电力。总之，电能已经成为国民经济和居民生活不可缺少的要素。

2011 年部分国家人均年消费电量见表。

2011 年部分国家人均年消费电量（kW · h）

国家	人均年消费电量	国家	人均年消费电量
加拿大	16406	德　国	7083
瑞　典	14029	韩　国	10162
美　国	13227	英　国	5518
法　国	7318	俄罗斯	6533
日　本	7847	意大利	5939

资料来源：国际能源署《世界能源关键数据统计 2013》。

人类社会已经形成以电力为主要能源的庞大生产力。尽管新的一次能源不断涌现，在相当长的时期内以电作为能源是难以被替代的。这些新的一次能源在相当长的时期内也要像核能一样转换为电能才能被社会所利用。

电与社会的关系　主要表现在社会公用性、发展依存性、反映敏感性、安全关联性等几个方面。

社会公用性　现代社会已进入电气化时代，电能成为社会必需品，一旦失去电源，社会生产无法进行，高速运行的社会流通领域无法运转，信息系统中断，居民的正常生活秩序难以维持。为此，世界各国通常都把电力事业作为公用事业，实行三项基本政策：①实行供电许可制；②销售价格由政府管制；③给予优惠的税赋、贷款待遇，以促其健康发展，满足社会需要。

发展依存性　电能消耗的增长以社会经济活动增长为基础，社会经济活动增长又以电能供应增长为条件，两者相互依存并显现出带有规律性的内在联系。一个国家或地区的产业、产品结构变化、生产技术的进步等，对两者依存关系有

较大影响。一般来说，重工业产值比重增加，综合单位产品（产值）耗电增加，反之则减少，尤以单位产品（产值）耗电大的载能体进出口数量增减，对国家综合产值电耗影响最大。在一定时期内，社会电能消耗的增幅曾超前于社会国内生产总值（GDP）的增幅。这是由于：①能源在社会经济活动中的地位日益重要，而一次能源又受自然条件制约，开发条件日益苛刻，把一次能源转换为电能再应用，一般可以提高一次能源的综合利用效果，这是世界各国经济发展曾经有过的规律。如美国1960～1982年，单位工业产值耗电增加10%，总能耗降低了41%。②社会生产的上游产品，一般经历一个由农业原料到工业原料的过程，而工业原料又经历由天然矿石开采到工业合成的转变，也有一个耗电增加的过程，因而使用电的增长超前于产值的增长。另一方面由于世界性传统能源日益枯竭的危机和人类社会环境保护的要求，可持续发展已受到全社会的广泛关注，促使能源特别是作为二次能源——电能的节约使用技术不断发展和推广应用。更由于社会单位产值中科技含量的比重日益增加而实物比重日益减少，因而在不同地区的不同经济发展阶段，单位产值电耗的下降因素日益显著。21世纪伊始，世界各国对环境保护要求的日益关注，使得节能减排已成为一个国际热点问题，给电能的消耗带来显著影响。

为了分析社会电能消耗的增长与GDP增长的关系，世人常以前者与后者之比，即电力弹性系数，进行量化比较分析。20世纪80年代以前，一些国家或地区，尽管个别年份电力弹性系数可能小于1，但就一个较长时期考察，通常弹性系数都是大于1的。1950～1976年几个主要国家的电力弹性系数，美国为1.9，苏联为1.3，英国为2.2，法国为1.45。进入80年代以后，很多国家都出现了电力弹性系数小于1的发展趋势。中国1949～1990年的41年中，工农业总产值年递增10.83%，而同期发电量年递增12.9%，电力弹性系数近似为1.19。而自1991～2010的20年间，GDP年均增长率为15.63%，同期发电量年均递增9.56%，电力弹性系数低于1，与国际上很多国家的发展趋势相似。

1949年中国的发电量为43亿kW·h，全社会用电量仅有34.6亿kW·h，当年工农业总产值466亿元（人民币），人均占有仅86元。农村地区很少有电，仅占全国耕地面积3.3%的水浇地也主要靠自流灌溉，电灌是少数；轻工业以纺织工业为支柱，其用电量占轻工业用电量的66%；重工业以采煤工业为支柱，煤炭工业用电占重工业用电的41%，工业的技术装备主要靠从英国、美国、法国等国进口；交通运输用电很少，铁路运输以蒸汽机车拖动；市政公用设施用电主要是少数大城市的上下水道、电车、商业、路灯和主要街道上居住的居民生活用电。用于居民生活的用电按全国人口平均，约为0.52kW·h。

经过60多年的经济建设，中国的全社会用电量（不含发电厂自用电和输变电损耗）以年平均大于12%的幅度增长，2010年达到41 999亿kW·h，为1949年的1214倍。2011年，中国人均用电量达到3483kW·h，超过了同期世界平均水平，但与发达国家相比，仍有很大差距。2011年美国人均用电量为13 227kW·h，日本为7847kW·h，俄罗斯为6533kW·h，都明显高于中国水平。

反映敏感性　由于电能的生产与使用处于瞬间相互平衡中，因而社会政治经济活动与用电水平紧密相连，用电的变化也同时从电力生产上反映出来。①不同用户的用电负荷有不同的用电时间特性。防暑降温和采暖用电都是季节性出现并随温度变化而变化；农业生产用电随季节和晴雨天气变化很大。旱期长，灌溉用电随时间递增，一旦降雨，用电陡降，如雨量过大，变为集中的排涝用电又陡增；一班制、两班制生产的工业企业用电常集中在白天和前夜，露天作业用电常因降雨而停止，昼间阴天又增加了室内照明用电；居民生活用电多集中在晚间，电炊用电多集中在饭前。②不同时间、不同用户的用电负荷叠加形成电力系统年、月、日的用电负荷高峰和低谷，要求电力生产必须随着用电负荷的变化及时调整发电出力和起停发电机组，否则将使电力系统运行频率偏移，电能质量下降，甚至影响电力系统的安全运行。与此同时，还要以不同方式促使用户进行用电负荷调整，尽量使用电负荷曲线趋于平稳（见用电负荷管理）。③社会政治经济形势的变化迅速在用电水平上得到反映。如在政治动荡、经济危机、罢工浪潮波及的地区，其用电量水平随之下降；反之，政局稳定、经济复苏、工人复工，其用电量水平也随之上升。因此，人们常把社会用电水平的变化看做是社会政治经济形势的“晴雨表”。图2为上海黄浦江夜景。



图2　上海黄浦江夜景（蔡耀放　摄）

安全关联性　人的视觉不能直接发现电的存在，当管理或使用不当时，电对人身、设备会产生极大的危害；供电一旦中断又将造成生产中断，社会瘫痪，甚至造成人身伤亡、设备损坏，引起电气火灾（见电气设备防火），即使是短时间停电，也将给社会造成严重影响。电能的供电质量包括频率偏移、电压的偏移、谐波和供电可靠性等，直接影响用户的生产安全和效益，影响程度决定于用户的用电性质。与普通商品不同，电能的供电质量保证除依靠发电厂、电力调度和供电部门外，还与用户使用状况有关，使用不当也将造成供电质量下降。用户的用电功率因数影响电力系统电压质量；用电负荷中的冲击负荷、不对称负荷、非线性负荷均会造成电力系统电压偏移、波动、闪变和波形畸变；用户内部电气事故有可能造成电力系统供电可靠性降低；在电力供应不足实行配额供电的电力系统，用户大量超配额和不按时间用电，可能影响电力系统频率质量，甚至引起更大的危害。因此，电力系统安全与供电质量，要依靠电力企业和用户共同保证。这是电与其他产品最不同的社会特征。

展望　能源与人口、资源、环境这三大人类面临的问题

息息相关，世界在发展，人口在增加，能源消费在增长。近百年来，煤炭，石油、天然气等可燃矿物燃料一直占能源总消费的 90%以上，而其枯竭日期早晚要到来。多数矿物燃料在利用过程中会产生有害气体和废弃物，造成环境污染，是影响人类可持续发展的核心问题。在没有更好可替代能源的今天，高效利用现有能源，发掘利用可再生能源是多年来人类社会为之奋斗的目标。

世界各国的统计数据都可以证明，人均耗电的增加是人均综合能耗降低的重要因素。作为二次能源的电力，不但可以高效转化为各种实用能，而且可以充分利用各种分散的可再生能源发电后集中利用，可免去分散矿物燃料消费中更严重的环境污染。因此，提高电能在终端能源消费中的比重是节约能源总消费，减少环境污染的重要手段，也是世界各国为之努力奋斗的方向。

中国是世界上仅有的少数几个在能源消费中以煤炭消费为主的国家之一，截至 2010 年煤炭消费约占总能源消费的 70%，较之前呈下降态势，在煤炭消费中仅有不到 40%用来发电后再向社会提供，而发达国家则已达到 80%～90%。因此，以电能替代其他能源在中国有着巨大的市场潜力，也是 21 世纪可持续发展的重要措施。

yongdian anquan biaozhi

用电安全标志 (electric safety sign) 用颜色和图形来表明用电场所和电气设备安全状态的记号。颜色标志常用来区分各种不同性质、不同用途的导线，或用来表示某处安全程度；图形标志一般用来告诫警示人们不要接近有危险的场所。明显、准确、统一的标志是保证用电安全的一项重要措施，为保证安全用电，必须严格按有关标准使用颜色标志和图形标志。图为用电安全标志示例。



用电安全标志示例

为便于识别电气设施状况，确保电气运行和检修人员的安全，防止作业人员误操作，在送、变、配电等场所用不同颜色来区别设备性质和特征。如电气一次系统的母线，黄色表示 A 相，绿色表示 B 相，红色表示 C 相，黑色表示接地线。在电气二次系统中，黄色表示交流电压回路，绿色表示交流电流回路，白色表示信号和警告回路。

中国安全色标采用的标准与国际标准草案（ISD）基本相同。常用的安全色标有：①红色。用来标志禁止、停止和消防，如“待维修　禁止操作”、信号灯、信号旗、机器上的紧急停机按钮、消防设施等。②黄色。用来标志注意危险，如“注意安全”“请勿靠近”“当心触电”等。③绿色。用来标志安全无事，如“在此工作”“已接地”等。④蓝色。用来标志强制执行，如“必须戴安全帽”“必须佩戴上岗证”“必须接地”等。⑤黑色。用来标志警告标志的几何图形和文字符号。

重要场所和电气设备上常利用灯光的颜色来提醒告诫人们注意用电安全，灯光色标有：①红灯。表示有电危险或用电设备正在工作，如电热器的红灯表示工作，警戒器的红灯表示危险，电气设备重地红灯表示“此处危险　闲人禁入”等。②黄灯。表示危险与正常的临界区，如电热器的“恒温”，警戒器的预警等。③绿灯。表示正常工作或安全用电，如“安全通道”等。

yongdian anquan guanli

用电安全管理 (safety management of electricity utilization) 以防御在用电过程中发生人身、财产安全和事故停电为目标的活动。发生用电安全事故，将可能产生危及生命或财产安全，引起供电中断等后果。电气设备、场地环境条件、电工作业行为都是影响用电安全的主要因素。为实现用电安全管理目标，需要组织实施一系列安全防护措施，包括制订安全措施计划，督查安全标准和规程的执行情况，开展用电现场作业过程的安全检查（包括电气设备的设计、安装、运行、检修，以及改进电气设备的制造工艺），规范电工的操作行为，提高用电设备运行维护的管理水平等。

用电的安全主要取决于电气设备安全可靠水平、使用操作行为的准确性，以及抵御恶劣环境的有效程度。用电设备的制造工艺质量，供用电装置的设计、安装、维护检修质量，作业者具有的安全知识和作业技能水平、资质等级能力，以及作业行为的规范性等都会对用电安全产生影响。用电过程中可能发生的事故主要有人身触电伤亡事故、电气设备损坏事故和电力系统停电事故。发生用电安全事故的主要原因有：①缺乏必要的安全用电知识或违反电气设备使用规定；②电气设备制造质量低劣；③供用电装置的设计、安装不符合标准；④施工单位不具备相应资质；⑤电气设备维护检修不当或不及时；⑥运行操作行为不符合安全规定和技术规范；⑦缺少必要的安全技术与组织措施等。

人类从用电事故中不断吸取教训。用电安全管理工作除改进电气设备的设计，提高电气设备的性能外，还制定了大量的规程、规范和标准，用以指导电气设备的制造、设计、安装、维护、检修工作，避免同类事故再度发生，不断提高用电安全水平。用电安全管理的日常工作内容主要有：①进行用电安全的宣传教育，普及用电安全知识，了解紧急救护法的基本要求，懂得常用电气设备的使用方法。②进行电工作业人员上岗前的技术培训、考核和日常的监督管理工作（见用户电工管理）。③进行规章制度执行情况的检查，主要检查国家与行业主管部门颁发的有关供用电安全的技术标准、法规和规章的执行情况。④常规的用电检查工作（见用电安

全检查），如供电设施施工中间检查、受电装置竣工接电前的检查、定期检查、季节性检查和特殊情况下的检查等。⑤指导和帮助用户做好安全技术与组织措施的落实。⑥组织推广用电安全的新技术、新装置和新经验。⑦其他用电安全工作的指导与帮助，如用户电气事故的应急处置（见用户电气事故管理），用户设备的修试检查（见用户电气试验）和用户继电保护管理、用户谐波管理、用户双电源管理等。

yongdian anquan jishu

用电安全技术 (safety technique for using electricity)

保证人身和电气设备用电安全，防止发生用电事故的技术和措施。用电安全技术包括：人身触电事故和各种电气事故的防护技术；触电急救；保证电气作业安全的技术措施和组织措施，包括制定安全技术标准、安全规程，建立安全管理制度，制定电气设备安装、运行维护规程，开展电气安全思想教育和电气安全知识教育；电气设备绝缘性能的测试技术；用电中的安全技术；电气装置的防火、防爆技术；电气安全用具和静电防护技术等。

保证用电安全的基本要素有：①电气绝缘。保持设备的良好绝缘，是保证人身安全和电气设备正常运行的基本要素。电气绝缘性能用绝缘电阻、耐压强度、泄漏电流、介质损耗因数等指标来衡量（见用电设备预防性试验）。②安全距离。带电体与地面、带电体之间、带电体与人体、带电体与其他设施等接近而不发生危害的安全可靠距离。③安全载流量。允许持续通过导体内部的电流量。超过安全载流量，导体会发热，导致绝缘损坏，可能引起漏电或火灾事故。④标志。明显、准确、统一的标志是保证用电安全的重要因素。标志分颜色标志和图形标志（见用电安全标志）。

电气设备安全技术　保证人身和设备安全，在安全技术上对设备要求：①对裸露于地面和人身易于触及的带电设备，应采取可靠的防护措施。②设备的带电部分与地面及与其他带电设备，应保持一定的安全距离。③易产生过电压的区域或设备，应装设过电流保护装置。④电气设备应可靠接地、接零，低压配电系统应装设剩余电流动作保护器。电气设备的保护接地和保护接零，是防止人体触及绝缘损坏的电气设备引起人体触电事故的有效措施。正确运用接地和接零保护是用电安全技术的重要内容。⑤在电气设备安装地点和工作场所应装设安全标志。⑥双电源及自发电供电的用户，应装设备用电源自动投入或双电源联锁装置，防止向停电设备倒送电。⑦根据某些电气设备的特性和要求，采取特殊的安全措施。

电业工作安全技术　违章作业是造成人体触电和设备事故的原因之一。在电气设备上作业时，应严格遵守电业安全工作规程，采取完善适用的保证作业人员安全的安全措施。安全措施分为安全技术措施和安全组织措施两大类。安全技术措施包括停电、验电、装设接地线、悬挂标示牌和装设遮栏；安全组织措施包括工作票制度，工作许可制度，工作监护制度，工作间断、转移和工作终结制度。安全措施按其作用又分为预防性措施和防护性措施两类。预防性措施用于防止危害人身安全因素的产生，工作票制度，工作许可制度，工作监护制度，工作间断、转移和工作终结制度，停电，验电，悬挂标示牌和装设遮栏属于这类措施。防护性措施是当发生危害因素时，能保护工作人员免遭伤害，装设接地线属于这类措施。在带电设备上工作，应遵守带电作业的有关规定。

防止人体触电　防止人体触电是用电安全技术的主要内容。因此，必须研究电流对人体的危害、触电方式及防止触电的安全措施，杜绝触电事故的发生。电流对人体的伤害是多方面的，电流对人体的伤害程度与通过人体的电流强度、持续时间、电压、频率，电流通过人体的途径以及人体的健康状况等因素有关。电流大小不同，引起人体的生理、病理效应不同。电流通过人体的效应是研究触电安全技术，制定安全防护标准及设计有关电气设备的基本依据之一。国际电工委员会（IEC）制定的《电流通过人体的效应》是世界各国研究成果中具有代表性和权威性的成果。中国已采用这项标准，并制定了相关的国家标准，如GB/T 3805《特低电压（ELV）限值》、GB 4208《外壳防护等级（IP代码）》、GB 13955《剩余电流动作保护装置安装和运行》、GB/T 13869《用电安全导则》等。

触电急救　发生触电事故，现场人员应以最快的速度、正确的方法，使触电者首先脱离电源，然后立即进行现场救护。人触电后，只要方法得当，坚持进行抢救，多数触电者可“起死回生”。触电事故是突然发生的，每个电气工作人员和其他有关人员必须熟练掌握触电急救法。

电气安全用具　为了防止人体触电、电弧灼伤、高空摔跌等事故发生，必须使用合格的电气安全用具。电气安全用具应定期检查、试验，并保持完好和良好的绝缘性能。应根据工作内容、工作环境和对象，合理选用电气安全用具，做到正确使用。

电气设备防火　电气设备的绝缘，多是采用易燃物质组成的。在运行中若发生短路或接地事故，设备损坏产生的电弧或火花，将引燃周围易燃物发生火灾或爆炸，危及人身安全。因此，在使用电力时，要研究电气火灾发生的原因，采取预防措施。火灾发生后要采用正确的抢救方法，防止发生人身触电及爆炸事故。（见电气设备防火）

静电防护技术　不同物质的接触和分离或相互摩擦产生的静电，不加防护，会导致火灾、爆炸和人体触电。在使用电气设备时，应采取措施控制静电的产生，加速静电泄漏，进行静电中和，防止静电的积累，以防止静电引起的电气事故和人体触电。

yongdian anquan jiancha

用电安全检查 (safety inspection for customers)

保证用电安全的具体督查行为。用电安全检查是用电安全管理的重要内容之一，是预防用电事故发生、保证人身及设备安全的重要措施，供用电设施的设计、施工、安装、运行以及用电环境、电工操作等都是保证用电安全的基础。电气设备投入运行后，由于受气象、环境、操作、检修、电气事故、负荷变化等因素的影响，其性能和寿命都会发生变化。因此，及时发现影响电气设备使用寿命及性能的安全隐患和缺陷，纠正电气检修、作业等方面的不安全行为，并采取措施加以消除，是用电安全检查的主要工作。

在中国，用电安全检查的范围和内容是依据《用电检查管理办法》确定的。除气象、环境特异的地区应满足本地区的特殊规定外，都应符合国家和电力行业颁布的供用电安全技术标准或规定。用电安全检查根据电气设备投运状况，分

为接电前检查与运行中检查两大类。

接电前检查 对用户受电装置的设计、施工、安装阶段进行的安全检查，包括电气工程设计图纸审核、施工中间检查、工程竣工检验。这三项检查是相互关联、依次进行的。

设计图纸审核 审核用户受电装置的电气工程设计图纸，是保证用电安全的首要环节，这项工作应在施工前进行。审核设计图纸的依据是国家和电力行业颁布的各类电力设计技术标准、规定和地区性的特殊规定。审核的主要内容包括：受电装置的接线与运行方式；继电保护方案与配合；防雷与过电压保护；隐蔽工程与接地装置；无功补偿与电压；双电源的并网方式；自备电源及接线方式；谐波的防治方案；房屋建筑的防火、抗震、防洪、防小动物及通风标准；通信联络手段等。

施工中间检查 主要针对隐蔽在地下的电缆沟、制作电缆头、变压器吊芯等工程项目进行检查，以消除隐蔽工程中的安全隐患，避免返工。中间检查一般需根据施工计划及进度分几次进行，施工过程中的每一关键节点都应进行检查。检查的项目主要有：电缆沟和隧道、直埋敷设的电缆、电缆头制作、变压器吊芯、断路器的解体、接地装置埋设、主要电气设备安装前特性试验等。检查依据为电力建设施工及验收技术规范和已审定的设计图纸要求。

竣工检验 用户受电装置的施工、安装、调试全部完毕后，要对整体进行一次全面的工程质量的检验，这是用户受电装置在接电前的最后一次检查，对保证电气设备安装质量和运行安全起着关键性的作用。竣工检验应遵循国家电力设计技术标准、施工及验收规范和设计要求进行。检验重点是与电力系统直接连接的一次设备，主要内容是：变配电工程施工是否符合设计要求，施工工艺是否合理；电气设备是否具备出厂合格证明、安装调试是否符合标准规定；施工图纸、试验资料是否齐全、准确；是否备有必要的合格的安全工具器材；各种防误操作装置是否齐全可靠；运行人员是否经过培训，并已取得合格资格；现场规章制度是否齐全。

运行中检查 为了预防设备事故，及时发现和处理设备存在的缺陷和运行中的问题而进行的安全检查。电气设备投入运行后，时常会遇到超越设计工况的情况，致使某些部位加速老化，如不及时发现和处理，必将引发电气事故。运行中检查分为定期检查、季节性检查、特殊性检查。这三种检查可单独进行，也可合并在一起进行。

定期检查 一种周期性的全面检查。检查周期根据用户供电电压、用电容量、用电性质等因素确定。定期检查的主要内容为：①对规章制度的建立和执行情况进行全面检查，主要检查现场规程是否齐全；工作票制度、操作票制度、交接班制度、巡回检查制度、预防性试验制度、设备缺陷管理制度、现场检修制度、设备事故分析制度等是否认真执行；各种档案、记录，如运行日志、值班记录、事故记录、设备缺陷记录、操作记录、检修记录、设备技术档案等是否齐备；各种反事故的技术与组织措施是否认真组织实施，消防及安全工具是否齐备。②对运行的电气设备进行现场巡视检查，主要从外观上对设备运行状况进行检查，查看是否符合规定，并逐一核对设备的试验、事故、缺陷和检修记录。

季节性检查 因地区季节变化，预计恶劣气候条件可能对电气设备安全运行构成危害，事先采取的一种有针对性的安全预防性检查。季节性检查的主要内容有：①春季安全检查。以防雷和设备预防性试验为主的检查，目的是查找冬季高峰负荷运行后存在的缺陷，防止污闪，为安全度过雷雨季节做准备。检查时间一般应在雷雨季节前。②度夏与防汛检查。针对夏季温度升高和雨量增加，汛期来临，为防御高温与洪水的危害，对电气设备载流部分、通风降温设备、排水设施、线路塔基、架空线弧垂进行的检查。检查时间一般安排在5、6月份。③防冻检查。针对冬季气温下降，为防御冰冻对电气设备的危害而进行的检查。检查内容以设备防冻、防冰凌、防污闪为重点。检查时间一般安排在冬季来临前，寒冷地区则在9、10月份。

特殊性检查 一种临时性检查。当发生特殊情况时，为保证用电安全而临时采取的一种对策。如有重大政治供电任务活动前进行的检查；事故后对有关设备的检查以及恢复送电后反事故措施执行情况的检查；自然环境突然恶化对电气设备正常运行带来严重影响时进行的特别巡视检查等。

yongdian baozhengjin

用电保证金 (deposits for using electricity) 用于电能计量装置损坏赔偿和用电后应缴纳电费债务担保的费用。用电保证金制度是世界各国普遍采用的做法，用以保护供电企业财产和债权。用电保证金分为电能表保证金（又称为电表保证金）和电费保证金。中国从1998年起实行电费和电能表保证金制度，1999年11月停止收取电费保证金和电能表保证金。

电能表保证金 电能计量装置一般由供电企业出资安装，但因装设在用户处，丢失损坏的现象十分严重，同时也影响了用户用电。为了保护供用双方的利益，法国、美国、中国等国家的供用电法规中明确规定，用户对电能计量装置负责保护，遇有损坏丢失，应承担赔偿责任。为预防电能表损坏丢失，规定用户在用电前应向供电企业存出电能表保证金，当发生电能表损坏丢失时，可用该保证金抵偿。用户用电终止时，可凭存出保证金时的收据予以全部退还。电能表保证金一般按电能表的市场价格存出。

电费保证金 为了预防用户用电以后，电费缴纳延期太久或用电后逃缴电费，日本、法国、美国等国家规定，对信誉不高的用户在用电前，应向供电企业存出不少于1个月电费数额的电费保证金。电费保证金在用户延期缴纳电费时，可冲抵该用户的电费，但用户缴纳电费后，冲抵的电费保证金应退存。电费保证金随用户需求的增加，可做逐年的调整。用户用电终止时，结清电费债务后，电费保证金应凭据退还用户。

yongdian fenxi

用电分析 (electricity consumption analysis) 对用电变化态势和成因做出判断的活动。用电分析的结果反映用电负荷变化与经济发展的相关关系和电能利用效果。将用电中的各项统计数据进行科学分类，并分别调查与其相应的国民经济各行业运行状况和居民生活状况，进行纵向、横向的定量、定性分析，找出带有规律性的影响社会经济发展因素，推断其发展趋势、存在问题，并提出发展电力、满足需求、改善电力供应等方面的建议。

世界各国电力企业的用电分析，主要为指导电力发展规划、分析电力成本、制订（修订）电价等服务。中国电力企业已经形成从上到下的逐级用电分析体系，着重为国家、地区制订国民经济发展中、长期计划和宏观调控服务；为用电行业或企业进行本行业、企业的用电情况及趋势分析，指导合理用电；动态分析用电变化及供电能力，为电力发展规划、电网安全运行、测算电力成本等提供服务和依据。用电分析的主要内容及重点研究的问题见表。

用电分析的主要内容及重点研究的问题

主要分析内容	重点研究的问题
用电申请行业、户数、容量	国民经济扩大再生产趋势
行业用电量升降	当前经济发展形势和动态
居民生活用电变化	居民生活电气化水平的变化
用电构成的变化	产业结构变化和调整
电费回收率	国民经济运转状况和电力企业资金周转状况
单位产品（产值）耗电升降	电能利用的效果和社会节电情况
用户电气事故统计	社会安全用电状况

用电分析分为定期综合分析与不定期分析两种。定期综合分析是较全面的分析，通常按月、季、半年和年度进行分析，侧重于当前国民经济中出现的突出问题，为开拓市场、调整策略、满足需求提供参考。不定期分析是针对随时出现的影响国民经济发展的用电新情况进行的专题分析，为促进电能的合理使用、开展需求侧管理提供决策依据。

yongdian fuhe

用电负荷　（electrical load）　电网供给用电对象的电功率。它可用功率表、电流表测量。用电对象包括用电的地区、用户以及用户内部的车间、工序、工艺或机台等。对于用电对象是单台用电设备的，用电负荷是指输入的电功率。对于用电对象是一个企业的，用电负荷则是指其受电装置电网侧输入的电功率。

在实际用电过程中，用电负荷是一个随机变量，每一瞬间数值的大小都有可能不同，常用用电负荷曲线来描述其变化状况。为了控制和比较的需要，在工程上，往往以15、30、60min平均值衡量，在负荷曲线上出现的用电负荷最大值称为用电最大负荷，最小值称为用电最低负荷，时段内实用电量除以该时段小时数为平均用电负荷。地区、用户用电负荷均衡程度，常以用电负荷率、年用电最大负荷利用小时描述，并通过用电负荷调整加以管理。

用电负荷在用户生产运行中的重要程度常以用电负荷级别表示，用电负荷根据其特性，可分为冲击负荷、不对称负荷和非线性负荷等。

yongdian fuhe guanli

用电负荷管理　（electric load management）　采用经济、技术和行政的手段推进电力消费合理化的活动。它是电力需求侧管理的一项重要内容，通过改变电力消费的时间和方式，促进均衡用电，提高电网负荷率，改善电网经济运行，优化电力资源配置和合理使用，同时也使用户从中受益。

用电负荷管理是对用电需求的管理，电力需求的多样性和不确定性，使得按满足用户最大需求建设的发、供电能力，在需求低谷时段大量被闲置，不仅增加了发、供电成本，而且也增加了用户的电费负担。为了改变这种状况，各国都相继采取了引导、鼓励、干预等用电负荷管理措施，使电力供需之间达到实时经济平衡。初期，通过指导企业调整生产班次或调整上下班时间，高峰停运大型用电设备，实行错峰用电，使电网负荷率得到改善。随后，推出了与用户利益挂钩的经济激励措施，进一步鼓励用户自愿去改变用电时间和用电方式，使电网负荷率获得进一步提高的同时，用户也从中减少了电费支出。随着科学技术的发展，对部分用户采取了直接控制用电负荷技术。控制技术与经济激励措施有机结合的用电负荷管理活动，在实施电力需求侧管理中发挥了巨大作用。

用电负荷管理的内容　包括负荷特性调查与管理决策、负荷分析与预测、负荷调整及负荷直接控制等。

负荷特性调查与管理决策　了解不同类型的电力消费具有的负荷特性和规律，为科学地管理负荷提供决策依据。对负荷特性的调查，主要包括：①负荷的可控性。哪类负荷可以耐受中断供电，中断供电多长时间不至于产生不良后果等，以此作为负荷能否直接控制的依据。②负荷的可塑性。哪类负荷可以转移，可转移的负荷量和时间等，以此确定负荷能否削峰填谷或移峰填谷或季节性用电的依据。③负荷的可替代性。负荷中断供电时可否用其他能源替代，而不至于降低能源服务质量。④负荷的可激励性。根据用户的用电强度（如用电单耗、小时电量等），评价经济措施被用户接受的程度与范围，以此决策采取措施的可行性和效果。

负荷分析与预测　见用电分析和用电负荷预计。

用电负荷调整　见用电负荷调整。

负荷直接控制　对某些具有可控性、可替代性的负荷，通过电力监控设备对其实施中断供电或限制用电（包括电力和电量）的措施。采取这种措施的情形：①发生电力系统事故或出现电力供应不足时，为保证电网安全运行和重要负荷的用电，电网调度部门不得已采取紧急措施。②发生高峰时段电力供需矛盾时，供电企业对某些用户实施的削峰或避峰等限制高峰用电措施。（见电力负荷管理技术）

中国用电负荷管理　中国的用电负荷管理始于20世纪50年代初期，主要通过用电监察开展调整用电负荷、节约用电和安全用电等工作（见用电检查）。1970年开始，因经济快速发展和电源建设不足使电力供应短缺，电力供应被迫采用计划用电方式对用电负荷进行管理，由“三电办公室”（计划用电、节约用电、安全用电）负责各省电力分配工作，用户按分配的用电指标用电，实行“不超不限、超用扣还”的政策。随着缺电程度的加深，用电指标的管理日益严格，在用电负荷管理上采取了以下措施：①在用户端安装电力负荷管理装置，直接对用户用电进行控制；②规定轮流周休日制度，必要时还采用了减少每周供电天数的办法；③对超过分配指标用电的，扣减电量或实行罚款。20世纪80年代初，中国开始试行峰谷分时电价和丰、枯水电价。2005年以后，中国开始实行可中断电价，对避峰让电企业给予补偿。随着市场机制的建立和完善，电价机制改革的深化，多元电价的推出，基于经济激励措施的用电负荷管理发挥的作用将会越来越大。

yongdian fuhe jibie

用电负荷级别 (classification of electrical load) 按突然中断供电是否对用电对象引起损害及其严重程度来区划用电重要性的等级标准。用电重要程度不同，对供电的可靠性的要求也不相同。

在中国，用电负荷级别由国家统一制定，其级别的划分根据用电负荷对供电可靠性的要求及中断供电在政治、经济上所造成损失或影响的程度来确定，分为一、二、三级。①一级负荷。中断供电将造成人身伤亡或将在政治、经济上造成重大损失的负荷。如造成重大设备损坏，有害物溢出污染环境，生产秩序混乱需要长时间才能恢复，重要交通枢纽无法工作，经常用于国际活动的场所秩序混乱等的负荷。②二级负荷。中断供电将在政治、经济上造成较大损失的负荷。如造成主要设备损坏，产品大量报废或大量减产以及人员集中的公共场所秩序混乱等的负荷。③三级负荷。不属于一、二级负荷的其他负荷。

为了预防突然中断供电可能引起人身伤亡、环境污染、重大设备损坏、社会秩序混乱等事件的发生，减轻突然中断供电可能造成的损害。事前按用电对象的用电重要程度划分用电负荷等级标准，以便在供电和受电工程以及生产工艺，土建工程设计、建设时，共同考虑采取相应保障安全的技术措施。

为了既经济又安全地供用电，用户在用电工程建设前，应按用电负荷不同级别，通过技术经济比较，先确定内部供电工程和非电保安措施，并与供电企业协商确定相应的外部供电方式和供电方案。非电保安措施与供用电工程应同步建设、同时投运、同样管理，以实现安全生产。

yongdian fuhelü

用电负荷率 (load factor) 用电对象在指定时期的平均用电负荷与期内出现的最大用电负荷的比值的百分数。其计算公式为

$$用电负荷率=\frac{指定期平均负荷}{指定期最大负荷}\times 100\%$$

计算用电负荷率时，常以一个车间、一个用户、一条供电线路或一个地区为用电对象，并根据指定时期的不同，可将用电负荷率分为日负荷率、月负荷率和年负荷率。

用电负荷率表面上反映了用电对象用电的均衡性，实质上反映了电力资源利用的状况。因此，它是一项很重要的用电技术经济指标，世界各国也都十分重视提高用电负荷率的工作。对不同的用电对象，影响日、月、年负荷率的因素也各不相同。因此，为了提高用电负荷率，实现均衡用电的措施也不尽一致。(见用电负荷调整)

为了评价同类用电对象的用电均衡性，常以指定时期内日负荷率的算术平均值，即平均日负荷率作为依据。其计算公式为

$$平均日负荷率=\frac{\sum 指定期日负荷率}{指定期日历日数}\times 100\%$$

由于不同地区、不同用户的日最大负荷出现的时间具有分散性，常以电网日最大负荷规律性出现的时段内，用户或局部地区的最大负荷代替日负荷率计算式中全天的最大负荷，依此计算的日负荷率通称尖峰负荷率或定点负荷率，据以考核用电负荷调整的效果。其计算公式为

$$尖峰负荷率=\frac{用户（地区）平均负荷}{\begin{array}{c}电力系统指定最大负荷出现\\时段内用户（地区）最大负荷\end{array}}\times 100\%$$

yongdian fuhe quxian

用电负荷曲线 (load curve) 用电负荷随时间变化的轨迹。用电负荷曲线反映用电负荷随时间变化的规律，曲线包含的面积代表电能使用量。用电负荷曲线按用电对象可分为用电设备、车间、用户、行业、地区、电力系统用电负荷曲线等；按用电时间可分为日、周、月、季、年用电负荷曲线等。用电负荷取值分为5、15、30min，1h或日、月平均值；在监视冲击负荷时则用瞬间负荷值。常用的用电负荷曲线为日用电负荷曲线、周用电负荷曲线和年用电负荷曲线。

日用电负荷曲线　以0～24时为横坐标，以用户、行业、地区、电力系统实际用电负荷为纵坐标绘制的用电负荷曲线。其用电负荷取值常取5、15、30、60min平均值或整点瞬时值。在研究日负荷变化规律时，在月内取一个或几个代表日的负荷曲线为代表，例如在电网的规划设计和运行调度中通常需要参考春、夏、秋、冬四个季节典型负荷日负荷曲线。代表日的选取对一个用户来说常以月中的正常生产日为代表；对地区、电力系统来说，常以避开法定周休日为代表，尽量选取与当月的平均日负荷率最接近的那一天。绘制日用电负荷曲线的目的是研究用电负荷中各类负荷组成和随时间变化的规律，从中分析用电负荷调整的潜力，并作为电力系统日生产运行调度的参考依据。

周用电负荷曲线　以周一至周日为横坐标，以该周每日最大、最小、平均负荷值为纵坐标分别绘制出的周最大、最小、平均用电负荷曲线，见图1。周用电负荷曲线可用于研究一周内日用电负荷变化规律，分析周负荷调整的潜力。

年用电负荷曲线　以每年12个月为横坐标（或每年的365天为横坐标），并以每月的日最大负荷值、每月的日最小负荷值以及月内平均日负荷值为纵坐标（或以每日的最大负荷值、日最小负荷值以及日平均负荷值为纵坐标）分别绘制出的用户、地区、电力系统的年最大、最小、平均用电负荷曲线，见图2。年用电负荷曲线主要用于研究用户、地区、电力系统用电的季节性规律，作为电力系统年生产运行调度、安排设备检修、用电负荷预计和研究年用电负荷调整潜力的重要参考依据。

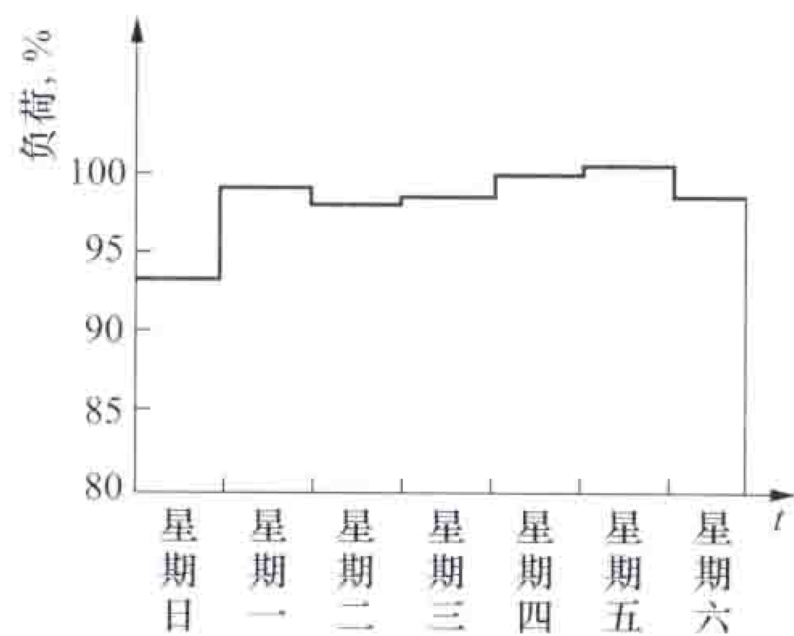


图1　周负荷曲线

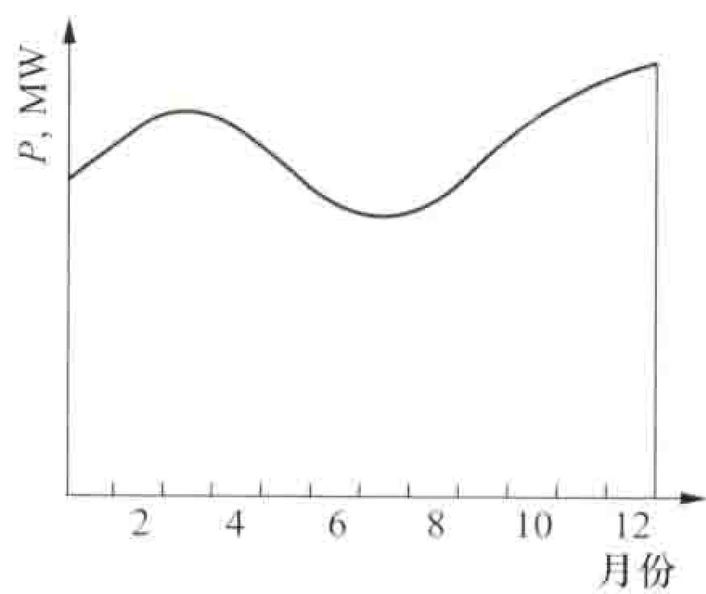


图2　年负荷曲线

yongdian fuhe tiaozheng

用电负荷调整 (electric load adjustment) 合理组织与安排各类用户的用电负荷及用电时间的措施。用电负荷是一个不断变动的量，其变化特性主要取决于地区的行业

结构、季节变化、经济发展和生活水平等因素。用电负荷在时间上的不均衡性使得不同时段的用电量存在差异，形成了用电高峰负荷与低谷负荷，也就出现了电力供应在高峰时段紧缺、低谷时段有余的现象，造成电力资源得不到有效利用。用电负荷调整就是通过有计划的、合理的优化方式，实现发电、供电、用电的协调平衡，提高整体社会效益。

主要内容　用电负荷调整就是调峰和调荷，这是一个问题的两个方面。调峰是调整各发电厂在不同时间段的发电功率，以适应用户在不同时间段的用电需求。调荷是调整用电单位的用电功率和用电时间，使不同时间段的用电需求与发电功率相适应。调荷的重点对象是工矿企业，要求在保证工况企业生产的前提下，实行地区及工矿企业内部的用电负荷调整，提高地区及工矿企业的用电负荷率。

调整原则　用电负荷调整的政策性强，涉及面广，应掌握以下原则：①统筹兼顾与安排。统筹考虑各方面的利益，既要服从电网的需要和电力供应的实际能力，又要考虑用户的可能条件和用电特点，合理调度，统筹安排。②保证重点。要以国家利益为重，优先保民生，保安全，保重点，保证重要场所、重要企业和重要负荷的用电。③区别对待。根据不同的电力系统、不同的电源结构、不同的用电结构，拟定不同的调整负荷方案，采用不同的调整负荷方法，保证社会正常的生产和生活秩序。④正确执行。用电负荷调整是引导用户改变用电时间，而不是限制用户用电，操作中两者不能混淆。

调整措施　主要包括管理措施、经济措施、技术措施和引导措施。

（1）管理措施。通过行政手段调整日负荷、周负荷、年负荷。调整日负荷措施有：①调整生产班次；②错开上下班时间；③增加深夜生产班次；④错开中午休息和就餐时间；⑤将非 24 小时生产的大用电设备安排在低谷时段使用；⑥尽量将日常检修安排在负荷高峰时段。调整周负荷措施有：①按行业、按地段或按供电线路周轮休，将一周内的休息日错开，保证周负荷的基本平衡；②对大型企业内部实行内部分厂（车间）轮休制。调整年负荷措施有：①根据年负荷曲线，在用电形势缓和的季节争取多用电，尽量避免设备的检修；②尽可能在高峰负荷期间安排工况企业的用电设备大修；③不需全年开工的用电企业应避开冬、夏高峰时期用电；④鼓励企业在丰水期多安排生产用电，避免弃水；⑤鼓励有一定库容的水电站蓄水，以待枯水期发电。

（2）经济措施。通过分时电价、避峰电价、季节电价等机制调整用电负荷。充分发挥价格的经济杠杆作用，引导和激励用户自行调整用电方式，错峰削峰、移峰填谷，改善用电负荷特性。分时电价是一天内实行不同电价（分尖峰、高峰、低谷、平段），用于调整日用电负荷；避峰电价是一周内实行不同电价（如可中断负荷电价、星期日电价等），用于调整周用电负荷；季节电价是一年内实行不同电价（如丰、枯电价和短时间的特殊电价等），用于调整年用电负荷。

（3）技术措施。采用电力负荷管理、电力蓄能、绿色照明等技术手段，进行用电负荷调整。电力负荷管理技术可以实现用电负荷监控到户，做到限电不拉路，是电网错峰、避峰、削峰的重要技术手段。电力蓄热包括电力蓄热及蓄冷空调等技术，既可移峰填谷，也可减少用户电费支出并起到保护环境的作用。采用绿色照明技术，淘汰低效电光源灯具，使用高效节能型家用电器等，可以大大削减晚高峰的用电负荷。

（4）引导措施。合理引导用户的电能消费行为，倡导节能节电，达到调整负荷的目的。包括普及电力负荷管理知识、传播电网错峰信息、推广节能节电技术、开展用电咨询服务、开办节能节电技术讲座、举办节能节电产品展示等。

yongdian fuhe yuji

用电负荷预计　（electric load forecast）　对未来时段用电负荷变化的趋势和水平做出的推判。用电负荷预计是进行城乡电力系统长远规划，安排电力工程建设，组织电力生产和拟定电力系统运行方式，确定市场营销策略和需求侧管理措施的基本依据。随着经济的全球化，贸易的国际化，用电负荷的不确定性更趋明显，工业负荷受产业结构、产品结构、市场变动的影响日趋加深，商业、居民生活负荷受气温变化、体育娱乐活动等的影响也在日益增大。

用电负荷预计必须结合国家宏观政策调整、国内外市场变化、国内外金融趋势以及气候、环境等因素进行修正，并采用多种方法进行推判、校核。用电负荷预计分为长期、中期、短期 3 种。①长期用电负荷预计为 10～15 年，作为编制电力系统规划的依据。②中期用电负荷预计为 5～10 年，通常作为安排大、中型电力建设工程基本建设进度的依据。③短期用电负荷预计是电力生产运行部门、市场营销管理部门经常进行的工作。短期用电负荷预计通常分为季和年度短期用电负荷预计及日或周的即期用电负荷预计，前者是制订电力生产计划、电力分配计划以及发电燃料供应计划的依据，后者作为安排电力系统调度运行方式的依据等。

短期负荷预计方法有单耗法、经验统计法和合成法。①单耗法。按照用电单位安排的生产数量（产量或工作量）和单位产品（产值）耗电的乘积进行用电量测算，再根据用电负荷率或年用电最大负荷利用小时进行用电负荷预计。这一方法适用于生产任务与耗电有相对稳定关系的用电对象。②经验统计法。按照历年同期用电量增长率，通过用电分析结合即期发生的新情况进行修正后测算用电量，再根据用电负荷率或年最大负荷利用小时进行用电负荷预计。它适用于用电比较稳定且无固定生产任务或生产任务与用电量缺乏稳定关系的用电单位或行业。③合成法。在用电地区内，有新的较大用电单位投入或撤出运行、有新的供电区联入或改由其他电网供电时，把增加（或减少）的新用电单位（地区）的用电负荷预计与原有各行业用电负荷预计合成即可求得预计的用电负荷。对用电量的合成可直接相加（或减），对用电负荷的合成为按用电负荷曲线合成。

见配电网负荷预测。

yongdian gonglü yinshu

用电功率因数　（power factor）　用电负荷的有功功率 P 与视在功率 S 的比值，又称力率。在交流电路中，用电功率因数在数值上等于电压与用电负荷电流之间的相位差 φ 角的余弦，即 $\cos\varphi=\frac{P}{S}$。

用户内部大量的供用电设备（如变压器、感应电动机、电力线路等）都是根据电磁感应原理工作的，是感性负荷。

它们除从电力系统吸取有功功率外，还要吸取无功功率，无功功率的消耗导致用电功率因数降低，因而占用了电力系统发供电设备提供有功功率的能力，或增加了发送无功功率的设施，同时也增加了电力系统输电过程中的有功功率损耗。用电功率因数的大小与用电负荷性质有关，如电阻炉等电阻负荷的功率因数为1，一般具有电感或电容性负载的电路的功率因数都小于1。功率因数低，说明电路用于交变磁场转换的无功功率大，设备及线供电损耗大。因此各国电力企业对用户的用电功率因数都有技术和管理的要求，并按用电功率因数的高低在经济上给予奖惩。

规定及奖惩　世界各国的电力企业要求用户的用电功率因数一般不低于0.85。

法国规定用户向电网取用无功电量与有功电量之比为60%（折合功率因数为0.857 5），低于或高于此比例时，按单位无功电量电价给予奖惩。

日本规定用电功率因数为0.85，超过或低于规定时，按一定比例减或增收基本电费收取额。对特高压电力用户功率因数计算办法为月内每日8～22时的用电功率因数加权平均值。

中国规定高压供电的工业用户和高压供电装有带负荷调整电压装置的电力用户，功率因数为0.90以上；其他100kV·A（kW）及以上电力用户和大、中型电力排灌站，功率因数为0.85以上；趸售和农业用电，功率因数为0.80。超过或低于以上标准的，按规定比例减或增应收电费总额（见功率因数调整电费）。用电功率因数计算办法为月内功率因数加权平均值，表达式为

$$\cos\varphi=\frac{W_P}{\sqrt{W_P^2+W_Q^2}}\quad 或\quad \cos\varphi=\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{W_Q}{W_P}\right)^2}}$$

式中 W_P 为月有功电量；W_Q 为月无功电量。

提高功率因数措施　有提高自然功率因数和人工补偿两种。

提高自然功率因数　未装设人工补偿装置时的功率因数，称为自然功率因数。一般从设备选择和运行上采取措施减少无功功率需要量，提高自然功率因数。具体的方法有：①合理选择感应电动机，使其额定功率与拖动的负载相匹配；②调整变压器负荷分配，使其在最佳负荷状态下运行；③合理安排和调整工艺流程，改善机电设备的运行工况；④控制机床、电焊机等用电设备空载运行的时间；⑤在生产条件允许的情况下，采用同步电动机代替感应电动机等。

人工补偿　装用无功功率补偿设备对功率因数进行补偿称为人工补偿。用户常用的无功功率补偿设备是电力电容器，又称并联电容器、移相电容器、静电电容器。

yongdian goucheng

用电构成　(electricity consumption structure)

在一个国家或地区内，各类用电对象在统计期内消费电能总量的组成。用电构成反映一个国家或地区在一个统计年度内国民经济的结构状况，其用电构成的历史变化可反映其经济发展的变化过程。不同国家（地区）之间用电构成，可反映其经济结构变化的相对特点和居民生活电气化水平的差异。由于世界各国对用电对象分类口径不完全相同，因而不同国家的用电构成只可进行大致比较。

19世纪末和20世纪初，电能的应用开始于电气照明，因此在用电构成中，以照明为主的居民生活用电和商业用电占很大比重。此后，世界上主要国家用电构成的发展经历了三个历史发展时期。第一个时期：随着人类历史进入利用能源的第三次飞跃，电能开始在工业生产上广泛应用，用电构成中工业用电比重逐步上升并占有很大比重，居民生活用电和商业用电比重因之相应下降，其比重变化的速度与不同国家、地区的经济特点、水平和技术进步速度密切相关。第二个时期：随着社会劳动生产率的逐步提高，劳动者要求改善生活条件，第三产业和居民生活用电有了更高的需求；与此同时，以电为代表的先进科学技术，从生产领域迅速向生活领域扩展，居民生活及第三产业用电比重又逐步提高，工业用电比重又相应下降。第三个时期：在一个国家，工业用电比重与居民生活用电比重，两项各占全部用电1/3左右时，比重变化趋于平稳。

发达国家的用电构成　世界上工业发达国家早已进入了后工业化时期，其用电结构特点为工业用电比重逐步下降，居民生活用电比重稳步上升。在产业结构比较完整的英国、美国等国家，已于20世纪80年代左右进入用电构成的第三个时期。1980～2011年主要工业发达国家用电构成变化见表1。

表1　1980～2011年主要工业发达国家用电构成变化（%）

行业＼年度	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2011
美国								
总计	100	100	100	100	100	100	100	100
工业	38.7	35.5	34.9	36.3	31.8	24.2	31.8	29.9
交通	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2
居民生活	33.0	34.1	34.1	33.3	33.2	35.7	34.9	34.5
农业、商业、服务业等	28.2	30.2	30.8	30.3	32.3	33.5	33.1	35.4
英国								
总计	100	100	100	100	100	100	100	100
工业	39.5	37.5	38.9	36.2	33.5	33.9	37.3	37.7
交通	1.2	1.2	1.9	2.4	2.5	2.5	1.1	1.3
居民生活	35.3	35.0	33.0	33.2	32.9	32.9	33.3	32.2
农业	1.2	1.6	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1
商业、服务业等	22.8	24.7	24.9	26.9	26.6	27.1	27.2	27.7
法国								
总计	100	100	100	100	100	100	100	100
工业	58.9	53.9	42.1	40.5	32.8	30.9	35.5	36.7
交通	3.2	3.0	2.8	2.6	2.9	2.7	2.5	2.6
居民生活	26.0	30.0	30.0	31.0	31.4	32.1	32.4	31.2
农业	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.7
商业、服务业等	11.2	12.3	24.4	25.2	25.3	26.8	28.9	27.8
加拿大								
总计	100	100	100	100	100	100	100	100
工业	46.1	46.6	42.8	44.6	40.39	39.23	45.0	44.7
交通	0.2	0.2	0.2	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7
居民生活	27.6	28.0	30.2	27.8	27.46	25.03	26.6	27.0
农业和渔业	2.5	2.4	2.2	2.0	1.91	1.89	1.7	1.6
商业、服务业等	23.6	22.8	24.6	24.8	25.0	27.99	26.0	26.0

续表

行业 \ 年度	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2011
德国								
总计	100	100	100	100	100	100	100	100
工业	52.1	49.7	50.1	47.9	45.42	42.98	48.2	49.9
交通	3.1	3.0	2.8	3.4	3.15	3.01	2.9	2.9
居民生活	25.4	26.4	25.0	26.9	25.51	26.26	24.2	22.1
农业	2.1	2.1	1.8	1.7	1.49	1.54	1.5	1.5
商业、服务业	17.3	18.8	20.3	20.1	21.44	23.03	23.2	23.6
意大利								
总计	100	100	100	100	100	100	100	100
工业	61.1	56.2	52.8	51.2	50.77	46.74	47.3	46.9
交通	3.3	3.2	2.9	3.1	3.04	3.2	3.3	3.3
居民生活	23.1	25.1	24.1	23.5	21.88	21.63	21.4	21.5
农业	1.6	1.9	1.9	1.9	1.75	1.74	1.7	1.8
商业、服务业等	10.9	13.6	18.3	20.3	20.26	23.85	26.3	26.5
俄罗斯								
总计	100	100	100	100	100	100	100	100
工业	66.2	64.7	65.1	52.4	40.99	39.85	56.3	57.3
交通	8.8	8.7	10.5	7.8	7.99	10.05	9.3	9.7
居民生活					18.47	13.16	14.3	17.3
农业	9.5	10.5	9.7	10.5	3.96	2.06	1.7	1.6
商业、服务业等	15.5	16.1	14.7	29.3	8.43	13.4	18.4	14.1

注：1. 资料来源：①联合国历年《欧洲电力年报》；②OECD（经济合作开发组织）历年《能源统计》；③OECD历年《电力信息》。
2. 德国1990年及以前为联邦德国统计数字。
3. 俄罗斯1990年及以前为苏联统计数字。
4. 2010、2011年数据来源：国际能源署统计数据。

中国的用电构成　从中国用电构成的历史变化看，1978年左右为进入用电构成第二个时期的大致分界点。

中国1949～1986年曾按旧用电分类统计，见表2。由于原统计口径过于笼统，1986年开始过渡按新口径统计，见表3、表4。新统计口径把乡镇工业用电从农村用电中剥离出来并入工业用电，把居民生活用电分列出来并把发电厂厂用电和输变电损耗也归入国民经济行业用电之内。2005年国家统计局颁布了《国民经济行业用电分类》，表5为2005年起中国国民经济行业用电分类情况。为了与世界各国对比，表中已把厂用电量和线损电量从国民经济总用电量中扣除后计算用电构成比例。

随着国民经济快速发展及人民生活水平提高，节能减排，

表2　1949～1986年中国用电构成（%）

部门、行业 \ 年度	1949	1952	1957	1978	1986
总　计	100	100	100	100	100
农村	0.58	0.69	0.66	13.67	16.43
其中：排灌	0.23	0.26	0.25	6.94	4.15
乡村工业	0.12	0.14	0.13	0.08	5.72
工业	69.07	79.99	82.92	79	72.89
其中：煤炭工业	14.74	13.33	12.95	7.21	6.26
石油工业	0.87	1.49	1.57	3.52	4.29
黑色金属工业	5.49	9.0	13.84	13.53	11.07
有色金属工业	0.87	3.31	8.68	6.68	5.56
金属加工和机械工业	4.91	6.15	7.11	8.42	8.3
化学工业	5.2	6.6	8.75	20.56	16.51
建材工业	2.31	4.93	4.33	3.82	5.37
纺织工业	21.96	20.99	11.61	4.11	5.38
造纸工业	3.18	5.35	4.91	2.07	2.21
食品工业	6.07	6.31	4.39	1.78	3.08
交通运输业	0.58	0.95	0.43	1.08	1.16
市政生活	29.77	18.37	15.99	6.25	9.52

表3　1986～1998年中国用电构成（%）

部门、行业 \ 年度	1986	1990	1995	1998
总　计	100	100	100	100
城乡居民生活	6.5	8.79	11.93	14.26
其中：乡村	2.56	5.09	5.11	6.03
城市	3.54	3.7	6.82	8.23
第一产业用电合计	8.38	7.92	7.3	6.86
农、林、牧、渔、水利	8.38	7.92	7.3	6.86
其中：排灌	4.2	3.51	3.2	3.16
农副业		1.94	1.7	1.55
1. 农业	4.78	5.48	4.94	4.7
2. 林业	0.1	0.09	0.14	0.1
3. 畜牧业	0.13	0.16	0.16	0.16
4. 渔业	0.1	0.14	0.17	0.16
5. 水利业	2.01	1.09	1.01	0.93
6. 其他	1.25	0.96	0.88	0.81
第二产业用电合计	79.33	76.04	71.86	68.38
一、工业合计	78.41	75.09	70.47	67.07
其中：轻工业	19.09	18.77	17.65	16.52
重工业	59.32	56.32	52.82	50.56
其中：乡镇工业		5.7	8.17	7.92
（一）采掘业合计	14.12	13.61	11.57	10.61

续表

部门、行业 \ 年度	1986	1990	1995	1998
1. 煤炭采选	6.47	5.89	4.53	3.88
2. 石油及天然气	2.34	2.67	2.67	2.68
3. 黑色金属	1.38	1.23	0.94	0.79
4. 有色金属	1.51	1.33	1.08	0.99
5. 建材及非金属	0.69	0.6	0.61	0.61
6. 采盐	0.15	0.13	0.12	0.11
7. 其他矿	0.03	0.03	0.04	0.06
8. 木材、竹材	0.22	0.19	0.15	0.14
9. 自来水	1.41	1.53	1.42	1.36
（二）制造业	64.29	61.49	58.9	56.47
1. 饮料、烟草	3.78	3.46	2.78	2.48
2. 纺织	4.9	4.55	3.81	3.52
3. 造纸	2.36	2.12	2.04	1.76
4. 电力蒸汽、热水	0.25	0.25	0.41	0.83
5. 石油加工	1.5	1.33	1.23	1.36
6. 煤气及煤制品	0.3	0.32	0.37	0.4
7. 化学工业	14.81	14.06	12.04	11
8. 医药	0.73	0.82	0.86	0.76
9. 化纤	1.14	1.15	1.14	1.25
10. 橡胶、塑料	1.29	1.3	1.64	1.81
11. 建材及非金属	6.56	6.09	6.81	6.29
12. 黑色金属	10	10.29	9.49	8.94
13. 有色金属	4.35	4.53	4.93	5.39
14. 金属制品	2.28	1.75	1.87	1.82
15. 机械工业	4.35	3.58	3.12	2.55
16. 交通、运输、电气、电子设备	2.28	2.22	2.25	2.43
17. 其他工业	3.39	3.61	4.12	3.86
二、地质普查及勘探	0.07	0.09	0.09	0.08
三、建筑业	0.85	0.86	1.3	1.23
第三产业用电合计	6.19	7.25	8.91	10.5
一、运输邮电通信	1.76	2	2.16	2.27
1. 交通运输	1.65	1.81	1.78	1.73
其中：管道运输	0.46	0.36	0.27	0.16
电气化铁道	0.47	0.72	0.85	0.99
2. 邮电通信	0.15	0.19	0.38	0.54
二、商业饮食仓储	1.09	1.47	2.26	3.05
三、其他事业	3.34	3.78	4.49	5.18
1. 公共服务	0.77	0.92	1.26	1.44
其中：市内公交	0.12	0.13	0.11	0.1
路灯	0.12	0.14	0.17	0.19
2. 卫生体育	0.36	0.43	0.49	0.54
3. 教育、文艺	0.69	0.77	0.8	0.87
4. 科研	0.3	0.33	0.35	0.36
5. 国家机关团体	0.56	0.67	0.78	0.94
6. 其他	0.65	0.66	0.81	1.03

表 4　2000～2004 年中国用电构成（%）

部门、行业 \ 年度	2000	2001	2002	2003	2004
消费总量	100	100	100	100	100
第一产业	5.00	5.18	4.71	4.06	3.68
农、林、牧、渔、水利业	5.00	5.18	4.71	4.06	3.68
第二产业	82.59	82.33	83.13	84.18	85.10
工业	71.66	71.55	72.44	73.03	73.98
采掘业	7.09	7.14	6.85	6.57	6.24
煤炭开采和洗选业	2.98	3.04	3.03	2.75	2.62
石油和天然气开采业	2.30	2.31	2.12	1.84	1.63
黑色金属矿采选业	0.45	0.44	0.46	0.57	0.64
有色金属矿采选业	0.58	0.58	0.53	0.67	0.66
非金属矿采选业	0.61	0.61	0.58	0.59	0.60
其他采矿业	0.18	0.15	0.12	0.15	0.09
制造业	48.03	47.75	48.66	50.01	51.44
农副食品加工业	1.15	1.15	1.19	0.90	0.92
食品制造业	0.71	0.64	0.69	0.49	0.46
饮料制造业	0.42	0.41	0.41	0.34	0.30
烟草制品业	0.23	0.22	0.19	0.16	0.14
纺织业	2.64	2.62	2.76	2.86	3.27
纺织服装、鞋、帽制造业	0.35	0.37	0.36	0.35	0.33
皮革、毛皮、羽毛（绒）及其制品业	0.19	0.20	0.22	0.22	0.21
木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业	0.23	0.25	0.23	0.28	0.28
家具制造业	0.09	0.10	0.07	0.08	0.09
造纸及纸制品业	1.69	1.71	1.73	1.64	1.64
印刷业和记录媒介的复制	0.22	0.24	0.21	0.41	0.36
文教体育用品制造业	0.15	0.17	0.19	0.15	0.17
石油加工、炼焦及核燃料加工业	1.75	1.81	2.01	1.76	1.88
化学原料及化学制品制造业	8.23	8.05	8.23	8.57	8.42
医药制造业	0.63	0.67	0.59	0.65	0.60
化学纤维制造业	1.39	1.33	1.25	1.09	1.03
橡胶制品业	0.70	0.72	0.66	0.67	0.68
塑料制品业	0.86	0.86	0.87	0.90	1.05
非金属矿物制品业	5.45	5.39	5.34	5.42	5.50
黑色金属冶炼及压延加工业	8.00	7.91	8.04	8.66	9.39
有色金属冶炼及压延加工业	4.98	4.87	5.00	5.63	5.73
金属制品业	1.40	1.52	1.71	1.87	1.97
通用设备制造业	1.15	1.14	1.22	1.30	1.27
专用设备制造业	0.67	0.64	0.62	0.63	0.69
交通运输设备制造业	1.45	1.55	1.57	1.48	1.63
电气机械及器材制造业	0.65	0.67	0.79	0.89	1.01
通信设备、计算机及其他电子设备制造业	0.90	0.88	0.91	1.14	1.26
仪器仪表及文化、办公用机械制造业	0.18	0.18	0.19	0.19	0.16
工艺品及其他制造业	1.55	1.49	1.39	1.22	0.98
废弃资源和废旧材料回收加工业	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02
电力、煤气及水生产和供应业	16.53	16.65	16.93	16.46	16.29

续表

部门、行业 \ 年度	2000	2001	2002	2003	2004	部门、行业 \ 年度	2000	2001	2002	2003	2004
电力、热力的生产和供应业	15.21	15.41	15.86	15.55	15.34	交通运输、仓储和邮政业	2.09	2.10	2.05	2.09	2.05
燃气生产和供应业	0.25	0.25	0.22	0.15	0.16	批发、零售业和住宿、餐饮业	2.92	3.02	3.04	3.27	3.35
水的生产和供应业	1.08	1.00	0.85	0.76	0.80	其他行业	4.77	4.67	4.61	4.79	4.72
建筑业	1.15	0.98	1.00	1.00	1.01	生活消费	12.41	12.49	12.16	11.76	11.22
第三产业用电	9.78	9.80	9.70	10.15	10.11						

表 5　2005～2011 年中国用电构成（%）

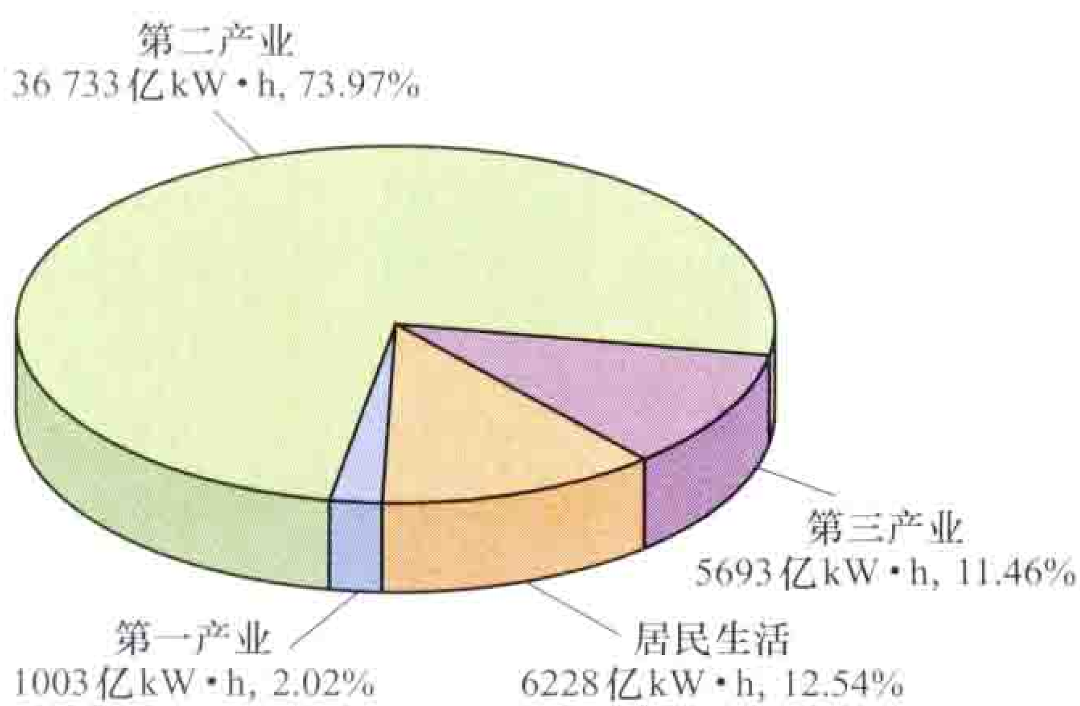
部门、行业 \ 年度	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
消费总量	100	100	100	100	100	100	100
第一产业用电合计	3.11	2.89	2.69	2.57	2.54	2.33	2.16
农、林、牧、渔、水利业	3.11	2.89	2.69	2.57	2.54	2.33	2.16
第二产业用电合计	75.20	75.34	75.20	74.57	73.66	74.77	75.03
工业	74.26	74.39	74.26	73.50	72.52	73.62	73.81
采掘业	5.94	5.17	4.86	4.93	4.76	4.63	4.78
煤炭开采和洗选业	2.36	2.03	1.84	1.85	1.87	1.79	1.74
石油和天然气开采业	1.55	1.11	0.95	0.92	0.90	0.83	0.80
黑色金属矿采选业	0.82	0.87	0.93	0.93	0.78	0.86	0.93
有色金属矿采选业	0.63	0.61	0.62	0.64	0.58	0.62	0.66
非金属矿采选业	0.46	0.43	0.41	0.42	0.42	0.37	0.46
其他采矿业	0.11	0.13	0.11	0.16	0.21	0.16	0.19
制造业	52.63	53.82	54.51	53.82	53.16	54.54	54.31
农副食品加工业	1.02	1.04	1.02	1.05	1.05	1.01	1.00
食品制造业	0.46	0.47	0.46	0.48	0.45	0.44	0.42
饮料制造业	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	2.32	0.31
烟草制品业	0.14	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
纺织业	3.30	3.61	3.44	3.26	3.10	3.04	2.93
纺织服装、鞋、帽制造业	0.35	0.38	0.38	0.38	0.36	0.36	0.35
皮革、毛皮、羽毛（绒）及其制品业	0.22	0.23	0.23	0.22	0.21	0.21	0.19
木材加工及木、竹、藤、棕、草制品业	0.42	0.45	0.45	0.51	0.52	0.51	0.50
家具制造业	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10	0.11	0.10
造纸及纸制品业	1.63	1.57	1.33	1.37	1.30	1.28	1.23
印刷业和记录媒介的复制	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.23	0.22
文教体育用品制造业	0.17	0.15	0.14	0.14	0.13	0.11	0.13
石油加工、炼焦及核燃料加工业	1.26	1.25	1.25	1.23	1.28	1.35	1.29
化学原料及化学制品制造业	8.54	8.53	8.50	7.99	7.85	7.50	7.51
医药制造业	0.61	0.56	0.52	0.53	0.51	0.53	0.51
化学纤维制造业	0.94	0.86	0.85	0.77	0.73	0.71	0.69
橡胶制品业	0.84	0.83	0.80	0.78	0.76	0.79	0.76
塑料制品业	1.29	1.24	1.16	1.26	1.24	1.27	1.13
非金属矿物制品业	5.69	5.86	5.67	5.67	5.74	5.84	6.21
黑色金属冶炼及压延加工业	10.23	10.63	11.19	10.69	10.86	11.00	11.17
有色金属冶炼及压延加工业	5.91	6.40	7.33	7.27	6.96	7.46	7.45
金属制品业	2.03	2.12	2.07	2.11	2.01	2.29	2.04
通用设备制造业	1.38	1.36	1.37	1.42	1.36	1.48	1.52
专用设备制造业	0.73	0.72	0.70	0.73	0.69	0.76	0.77
交通运输设备制造业	1.21	1.21	1.28	1.37	1.53	1.88	1.83
电气机械及器材制造业	0.99	0.99	1.04	1.16	1.14	1.21	1.24
通信设备、计算机及其他电子设备制造业	1.31	1.41	1.47	1.54	1.51	1.60	1.57
仪器仪表及文化、办公用机械制造业	0.17	0.18	0.19	0.19	0.19	0.20	0.18
工艺品及其他制造业	1.11	0.99	0.88	0.91	0.91	0.90	0.90
废弃资源和废旧材料回收加工业	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
电力、煤气及水生产和供应业	15.70	15.39	14.88	14.76	14.60	14.45	14.72
电力、热力的生产和供应业	14.83	14.57	14.07	13.91	13.72	13.56	13.86

续表

部门、行业 \ 年度	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
燃气生产和供应业	0.12	0.11	0.14	0.16	0.19	0.20	0.19
水的生产和供应业	0.75	0.71	0.67	0.69	0.69	0.69	0.67
建筑业	0.94	0.95	0.94	1.06	1.14	1.15	1.22
第三产业用电合计	10.12	10.04	9.69	10.14	10.65	10.68	10.86
交通运输、仓储和邮政业	1.73	1.63	1.63	1.66	1.67	1.75	1.80
批发、零售业和住宿、餐饮业	3.02	2.96	2.84	2.95	3.07	3.08	3.20
其他行业	5.38	5.44	5.22	5.54	5.91	5.85	5.86
生活消费	11.57	11.72	12.42	12.73	13.16	12.22	11.95

注：不含港、澳、台地区的数字。

环境保护等国策实施程度及效果，中国的全社会用电量快速增长，用电结构逐步优化。1980年以来，第一产业、第二产业用电量占全社会用电量比重逐步下降，第三产业和居民生活用电量比重逐步增加。第一产业用电量占全社会用电量的比重从1980年的9.0%下降到2012年的2.02%；第二产业用电量占全社会用电量的比重从1980年的83.8%下降到2012年的73.97%；第三产业用电量占全社会用电量的比重从1980年的3.7%上升至2012年的11.46%；城乡居民生活用电量占全社会用电量的比重从1980年的3.5%上升到2012年的12.54%。2012年中国用电构成见图，2011年中国与部分国家用电构成比较见表6。



2012年中国用电构成
（资料来源：《2013中国电力年鉴》）

表6　2011年中国与部分国家用电构成比较（%）

行业分类	中国	俄罗斯	德国	日本	美国
工业	75.03	57.3	49.9	34.3	29.9
农业	2.16	1.6	1.5	0.1	0.0
交通运输	1.6	9.7	2.9	1.9	0.2
商业和公共服务	9.3	17.3	23.6	34.8	35.4
居民生活	11.95	14.1	22.1	28.9	34.5

资料来源：中国数据来自《2012中国电力年鉴》，国外数据来自国际能源署统计数据。

yongdian jiancha

用电检查　(inspection on power utilization of customers)

对用户电力使用情况和用电行为进行检查的活动。《中华人民共和国电力法》第三十二条规定，授权供电企业对用户的电力使用情况履行检查职责，并接受国家电力管理部门的监督管理。用户受电设备是电力系统的组成部分，其内部的电气事故可能影响电力系统安全运行而形成公害。安全、经济、合理地供好电、用好电，授权供电企业依法开展用电检查工作，是维护社会经济发展中供用电公共安全的需要，也是符合电力供应与使用规律的一项有效制度。

在中华人民共和国成立初期，为加强对电力供应与使用的管理，提高发、供电设备的利用率，促进合理和节约用电，根据苏联的经验，从1952年起，推行了用电监察制度。各基层电力部门都设立了用电监察机构，对用户的用电情况开展监督、检查、指导和帮助工作。1963年，颁布了中国第一个《用电监察条例（草案）》，明确用电监察的范围主要是调整用电负荷、节约用电和安全用电。由于电力部门政企不分，除监督外，还增加了检查、指导和帮助的内容。1972年以后，电力供需矛盾突出，用电监察工作的内容发展成为以“计划用电、节约用电、安全用电”为主。1983年颁布了修订后的《用电监察条例》，明确了监督与服务的关系，并对从事用电监察工作的人员提出了知识技能考核要求，同时，把对用户营销管理的有关内容也纳入了用电监察管理范围。多年来，用电监察制度对国家加强电力使用管理起到了应有的保证作用。1996年，根据《中华人民共和国电力法》第三十二条、第三十三条和《电力供应与使用条例》的有关规定，电力工业部按政企分开的原则，分别制定了《供用电监督管理办法》和《用电检查管理办法》。《用电检查管理办法》主要用于规范供电企业用电检查行为，促使供电企业依法履行好国家授予的查电职权，及时、有效地制止危害供用电安全和扰乱供用电秩序的违法行为，保护用户的合法权益，做到安全、经济、合理地供好电、用好电。

用电检查制度是供电企业依法执行用电检查工作、用电检查人员依法履行职责的重要法律依据。它与过去的用电监察工作是有根本区别的：①实行政企分开，执行主体性质有别，供电企业依法进行查电；②检查内容和范围更加明晰具体；③用电检查人员实行考核聘用制度；④强化了用电检查程序；⑤严肃了用电检查纪律。

检查内容　包括：①用户执行国家有关电力供应与使用的法规、方针、政策、标准、规章制度情况；②用户受（送）电装置工程施工质量检验；③用户受（送）电装置中电气设备运行安全状况；④用户保安电源和非电性质的保安措施；⑤用户反事故措施；⑥用户进网作业电工的资格、进网作业安全状况及作业安全保障措施；⑦用户执行计划用电、节约用电情况；⑧电能计量装置、电力负荷管理装置、继电保护和自动装置、调度通信等安全运行状况；⑨供用电合同及有关协议履行情况；⑩受电端电能质

量情况；⑪违章用电和窃电行为；⑫并网电源、自备电源并网安全状况。

检查范围 主要是用户受电装置，但遇有下列情况之一者，检查的范围可延伸至相应目标所在处：①有多类电价的；②有自备电源设备（包括自备发电厂）的；③有二次变压配电的；④有违章现象需延伸检查的；⑤有影响电能质量的用电设备的；⑥发生影响电力系统事故需作调查的；⑦用户要求帮助检查的；⑧法律规定的其他用电检查。

人员资格认可考核程序 由跨省电网经营企业或省级电网经营企业负责组织用电检查资格认可的统一考试，合格后发给相应的用电检查资格证书。用电检查资格证书由国务院电力管理部门统一监制。用电检查人员的资格分为一级用电检查资格，二级用电检查资格，三级用电检查资格三类。

检查程序与纪律 ①现场检查时，用电检查员的人数不得少于两人。在执行用电检查任务前，用电检查人员应按规定填写用电检查工作单，经审核批准后，方能赴用户处执行查电任务。在执行查电任务时，用电检查人员应向被检查的用户出示用电检查证。②经现场检查确认用户有不符合安全规定或在电力使用上有明显违反国家有关规定的，用电检查人员应开具用电检查结果通知书或违章用电、窃电通知书一式两份，一份送达用户并由用户代表签收，一份存档备查。③现场检查中确认用户有窃电行为的，用电检查人员应当场予以中止供电，并按规定追补电费和加收电费，必要时报请电力管理部门、公安机关或司法机关予以处罚。④查电工作终结后，用电检查人员应将用电检查工作单交回存档。用电检查人员必须遵纪守法，依法检查，廉洁奉公，不徇私舞弊，不以电谋私。违反规定的，给予经济的、行政的处分，构成犯罪的，依法追究刑事责任。

yongdian leibie

用电类别 (types of electricity consumption) 根据用户用电行为（或属性）进行的用电性质归类。用电类别一般与销售电价分类相对应，便于政府部门管理、供电企业执行及电力用户认知。

长期以来，中国的用电类别比较复杂，采用以用电用途为主的方法进行分类，主要有大工业用电、普通工业用电、非工业用电、居民生活用电、非居民照明用电、商业用电、农业生产用电等几大类。2005 年，国家发展和改革委员会颁布了《销售电价管理暂行办法》，将逐步实现以用电用途为主进行分类，改为以供电成本、用电负荷特性为主进行分类，并根据用户的承受能力逐步调整到居民生活用电、农业生产用电、工商业及其他用电三个类别。现阶段为过渡期，其用电类别分为居民生活用电、大工业用电、农业生产用电、贫困县农业排灌用电、一般工商业及其他用电（将非居民照明用电、普通工业用电、非工业用电、商业用电归并）五个大类。

居民生活用电指城乡居民住宅用电、城乡居民住宅公用附属设施用电、学校教学和学生生活用电、社会福利场所生活用电、宗教场所生活用电。

农业生产用电指农业用电、林木培植和种植用电，畜牧业用电，渔业用电，农业灌溉用电，农、林、牧、渔服务业用电。

工商业及其他用电指大工业用电、中小化肥用电、商业用电、农副产品加工用电。

yongdianliang

用电量 (amount of electricity consumption) 用电对象消耗有功电能的数量，以 kW·h（千瓦·时）为计量单位。它是用电的有功功率与时间乘积的累积量，常用电能表计量。根据用电对象的不同，可分为单台用电设备用电量、产品的生产用电量、企业（车间、工序、工艺）用电量（包括其内部输变电过程中的损耗电量），国民经济行业用电量或部门用电量、生活用电量等。

用电量是一项重要的能源消费量，与全社会发电量、总装机容量一样，在一定程度上反映了一个国家或地区的社会经济发展、技术进步等情况。世界各国都按工业，交通运输、农业、居民生活、商业服务业进行分类统计。中国用电量分类统计比其他国家要复杂，主要是工业用电量统计是按行业分类进行。（见用电构成）

用电量主要用于能源消费的统计、贸易结算、设备和产品能耗评价。①对无自备电源的用户，用电量是供电企业与用户按合同进行贸易结算售电量的依据；而对有自备电源的用户，用电量还应包括该用户自发自用的电量在内。②行业用电量为该行业内各生产企业的用电量之和，以此进行用电分析和长短期负荷预测；地区、电网用电量除包括地区内各用户用电量之和外，还包括地区公用输变电损耗电量，用作电网潮流计算和考核地区用电或网间送受电经济合同的贸易结算依据。③以用电量为依据，对用电设备性能及单位产品能耗进行分析评价。

2011 年世界电力消费量（用电量）最大的 8 个国家排序见图 1。1980～2012 年中国全社会用电量见图 2。1980～2012 年中国人均年电力消费量见图 3。2011 年部分国家和

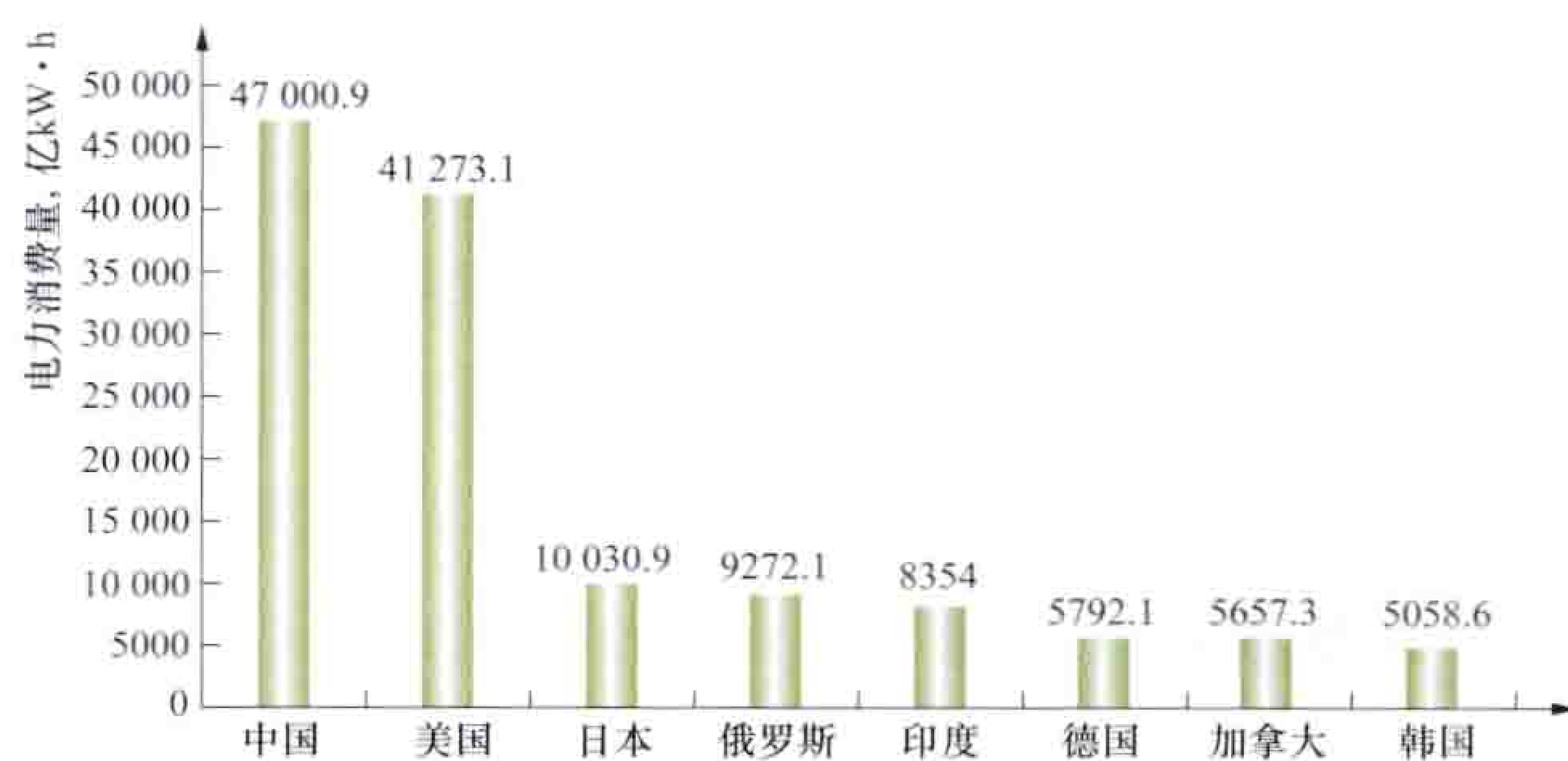


图 1 2011 年世界电力消费量最大的 8 个国家排序

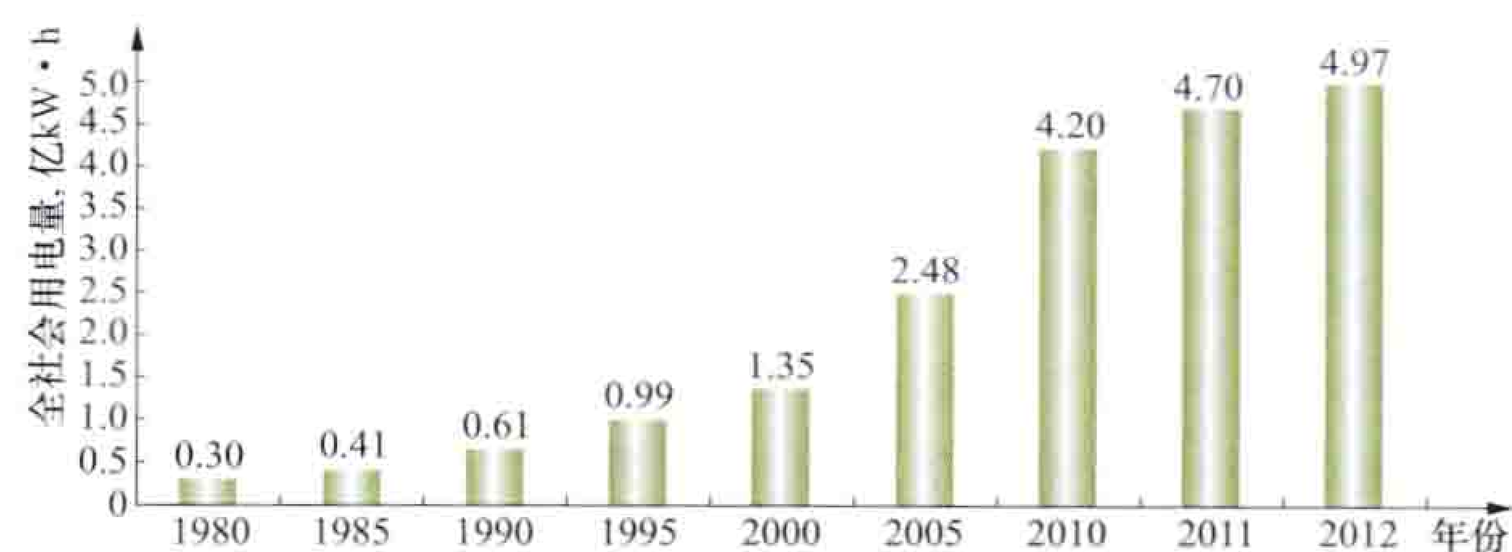


图 2 1980～2012 年中国全社会用电量

地区人均年电力消费量比较见图 4。

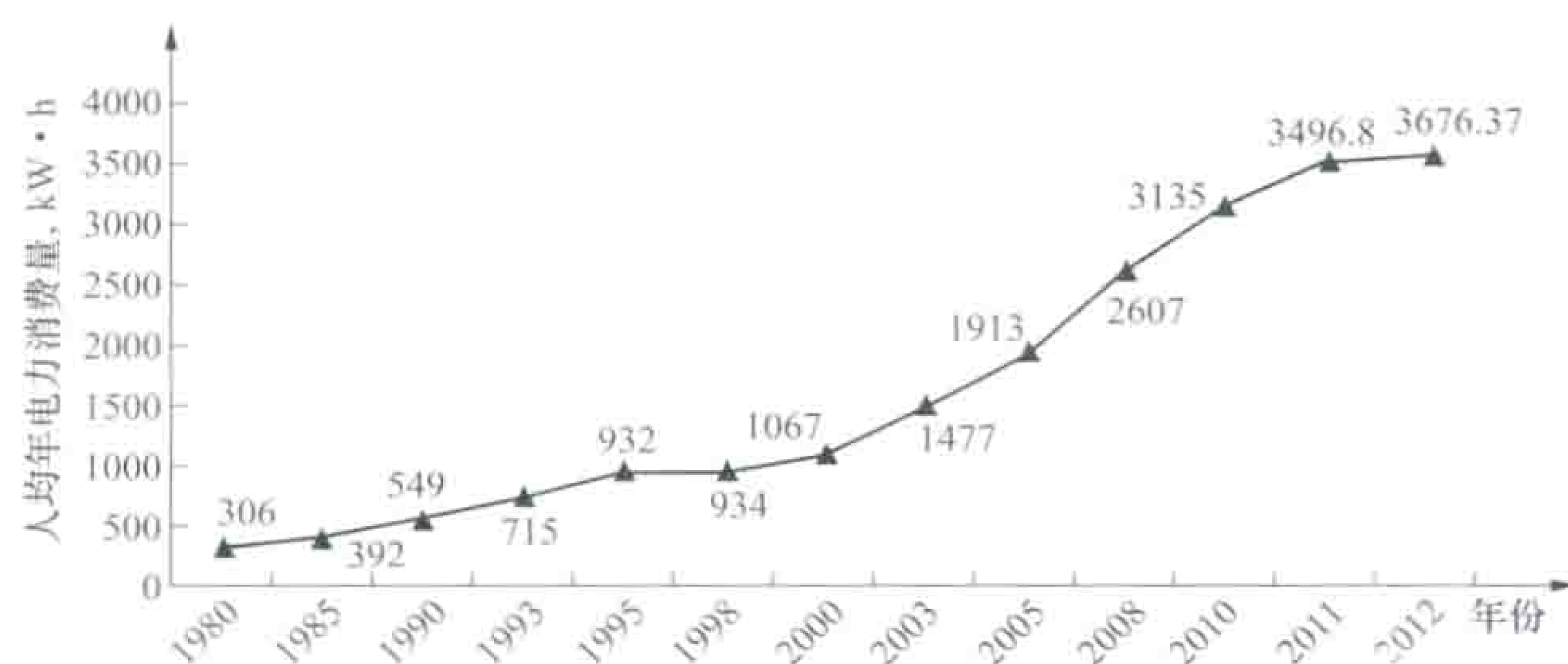


图 3 1980～2012 年中国人均年电力消费量

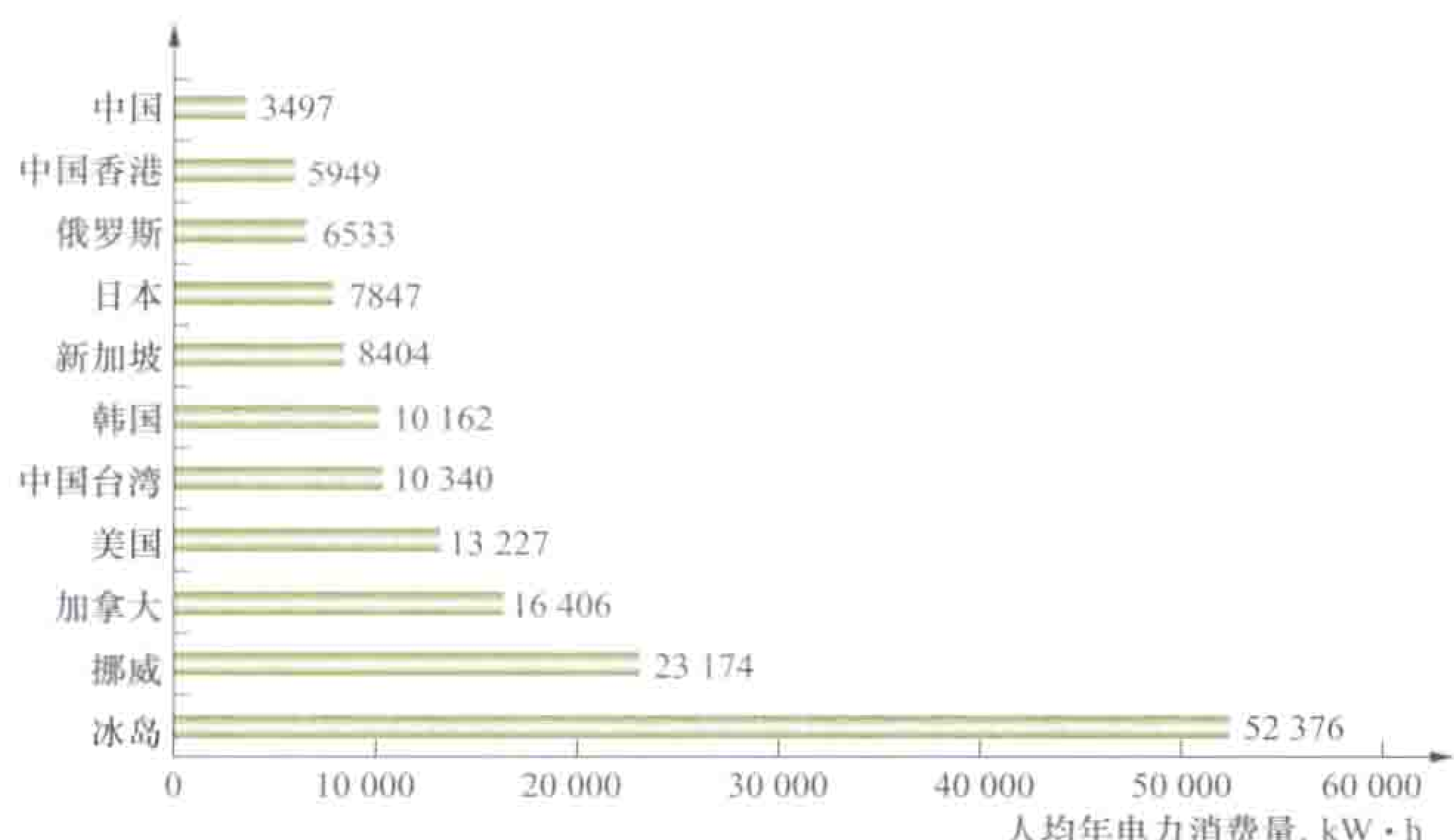


图 4 2011 年部分国家和地区人均年电力消费量比较

yongdian rongliang

用电容量 (capacity of electricity consumption)

用户用电需求可能出现的最大电功率值，单位为 kW 或kV·A。用电容量不仅反映用户用电最大需量，也是供电企业为满足用户的用电需求而必须具备的供电能力。

用电容量是建立供用电关系过程中常用的非常重要的特征量。在用户申请用电时，一般按下列惯例确定其用电容量：①对低压供电的用户，按其每台设备的额定容量之和计算；②对高压供电用户，按其受电变压器额定容量之和，并加上该用户有不经变压器而直接接入电网用电的高压电动机额定容量之和计算。用电容量是供电企业供电方案确定、供电工程设计、计量方式确定、继电保护整定、用电负荷管理的依据。对实行两部制电价的用户，可按规定选择用电容量或用电最大需量来计算基本电费。

yongdian shebei yufangxing shiyan

用电设备预防性试验 (preventive test for electrical equipment) 对用电设备绝缘状况进行的定期试验和检查。用电设备在运行中，由于受电场力、运行温度、空气湿度和腐蚀性气体等因素影响，绝缘状况不断劣化。为判断设备能否继续投入运行，预防设备损坏和保证安全经济运行，须在停电状态下进行预防性试验。对某些试验，如绝缘电阻测量、介质损耗因数测量、泄漏电流测量等采用带电测试方法，更能如实地反映设备在运行中的实际状况，这也是预防性试验的发展方向。

常用的预防性试验项目有绝缘电阻测量、泄漏电流（采用直流电压）测量、介质损耗因数测量、交流耐压试验四项。前三项属非破坏性试验，只对绝缘的损伤、受潮、气隙含有程度、电晕放电程度和绝缘老化程度进行判断。一般采用比较法对绝缘状况进行判断，即将本次测得的数据与本设备或同类设备或同一设备不同相、不同绕组的历年预防性试验测得的数据做比较。非破坏性试验所加试验电压低于被试品工作电压，对绝缘损害极小。交流耐压试验属破坏性试验，通常在非破坏性试验合格后进行，以检验设备绝缘在规定时间内能否承受规定的电压，以确定设备的耐压水平及能否投入运行。破坏性试验所加试验电压比工作电压高得多，能充分暴露设备绝缘缺陷，但在试验中对设备绝缘可能带来不可逆损伤。

绝缘电阻测量 在设备维修时，广泛地将这项试验用于常规绝缘试验，以了解绝缘材料受潮、污秽、老化等状况；在电气设备使用前，测量绝缘电阻以检验设备通电时性能是否良好，判断运行设备发生故障的位置和状态。常用的测量仪器是绝缘电阻表，俗称兆欧表、摇表。它由直流高压电源和直读式绝缘电阻计组合而成，有手摇式、电动式和半导体式，额定电压有 500、1000、2500、5000V。根据不同的摇测对象，选用不同规格的绝缘电阻表进行绝缘电阻测量。绝缘电阻值取 1min 的读数。

泄漏电流测量 对绝缘物施加直流电压时，通过绝缘物的电流有位移电流、吸收电流和泄漏电流，其中泄漏电流随绝缘材料种类和状态的不同，变化甚大。依据泄漏电流的变化，可以分析绝缘物的受潮、污秽、老化程度，对发现绝缘局部缺陷有特殊意义。泄漏电流测量属非破坏性试验，在直流电压下绝缘内部游离放电、发热等均远较交流电压下轻微。直流电压下的泄漏电流测量在逐步升压过程中，可随时监视仪表的读数，了解绝缘状况。泄漏电流测量的试验装置由直流高压电源、电压表及直流检流计组成。

介质损耗因数测量 测量绝缘物在施加交流电压时的介质损耗因数（$\tan\delta$），用 $\tan\delta$ -电压特性和 $\tan\delta$ -温度特性来检查绝缘物的受潮、污秽及劣化程度。$\tan\delta$ 是表示绝缘介质内功率损失的相对参数，能反映整个绝缘的分布缺陷。测量 $\tan\delta$ 的仪器有西林电桥、反西林电桥、简易西林电桥、介质损耗测量仪及 ZT1 型介质测量仪。西林电桥测量精度高，是最通用的试验设备。为了正确测量绝缘物的 $\tan\delta$，在被试绝缘物上要装设屏蔽电极。

交流耐压试验 试验时对绝缘物施加高于工作电压数倍的交流试验电压，并加压一定的时间。交流耐压试验是鉴定设备绝缘强度最有效、最直接的方法，可以判断电气设备长期使用中的安全性，是保证电气设备绝缘水平，避免发生绝缘事故的重要手段。常用的试验方法有：①在低压侧进行测量，再将数值换算到高压侧；②用电压互感器测量；③用高压静电电压表直接进行测量；④用电容分压器进行测量；⑤用球隙测量，试验装置由试验变压器、保护电阻、调压设备、电压测量仪器、击穿指示器及信号装置等组成。

yongdian shenqing

用电申请 (application for power supply) 用户向供电企业提出新装增容或变更用电愿望的表述。用电申请一般以书面形式，也通过 95598 供电服务热线或 95598 供电服务网站办理。用电申请是用户报装时需办理的第一个程序，也是供用电双方建立（或变更）供用电关系的第一个步骤。

为了双方相互了解，能够安全、经济、合理地供用电，

并建立起良好的合作关系，供电企业应在用电营业场所公告办理各项用电业务的工作程序、规章制度和收费标准。用户在提出用电申请时，需向供电企业提供用电工程项目批准的文件及有关的用电资料。主要内容包括：用户名称、用电地点、电力用途、用电性质、用电设备清单、用电负荷、保安用电设备容量和保安负荷数量、用电规划、开户银行和账号等；用电容量在100kW以上的用户还应提供用电功率因数的计算和用电无功补偿装置容量；高耗能、高排放企业需提供政府批文和环境评估报告。

用电申请者提供的文件资料，主要用于供电方式或供电方案的确定，并为签订供用电合同提供基本的依据。

yongdian xinxi caiji xitong

用电信息采集系统 (electricity consumption information collection system) 对用户用电数据进行采集、管理、控制的软硬件集合体。用电信息采集系统通过对用电工况信息数据的收集、处理和监控，实现用电数据自动采集、用电工况状态和电能质量实时监测、供用电信息发布、智能用电设备信息交互等功能，支撑自动抄表、错峰用电、用电检查、负荷预测和节约用电成本等方面的业务应用。

沿革 用电信息采集系统的雏形是自动化抄表系统，在欧美起步较早，20世纪70年代后，一些欧美发达国家开始对远距离抄表展开研究。美国在20世纪80年代成立自动抄表协会（AMRA），欧洲在20世纪90年代成立欧洲自动抄表协会（EUROAMRA）、英国自动化抄表协会（UKAMRA）。同时期IEC的TC13和TC57两大标准化组织都制定了自动化抄表系统的相关标准。自动化抄表系统在欧美的应用已达到大规模推广的实用阶段。中国从1978年开始研究电力负荷管理技术，20世纪90年代开始研究远程自动抄表系统，这两项技术很快得到了推广应用，并在此基础上逐渐发展形成了用电信息采集系统。

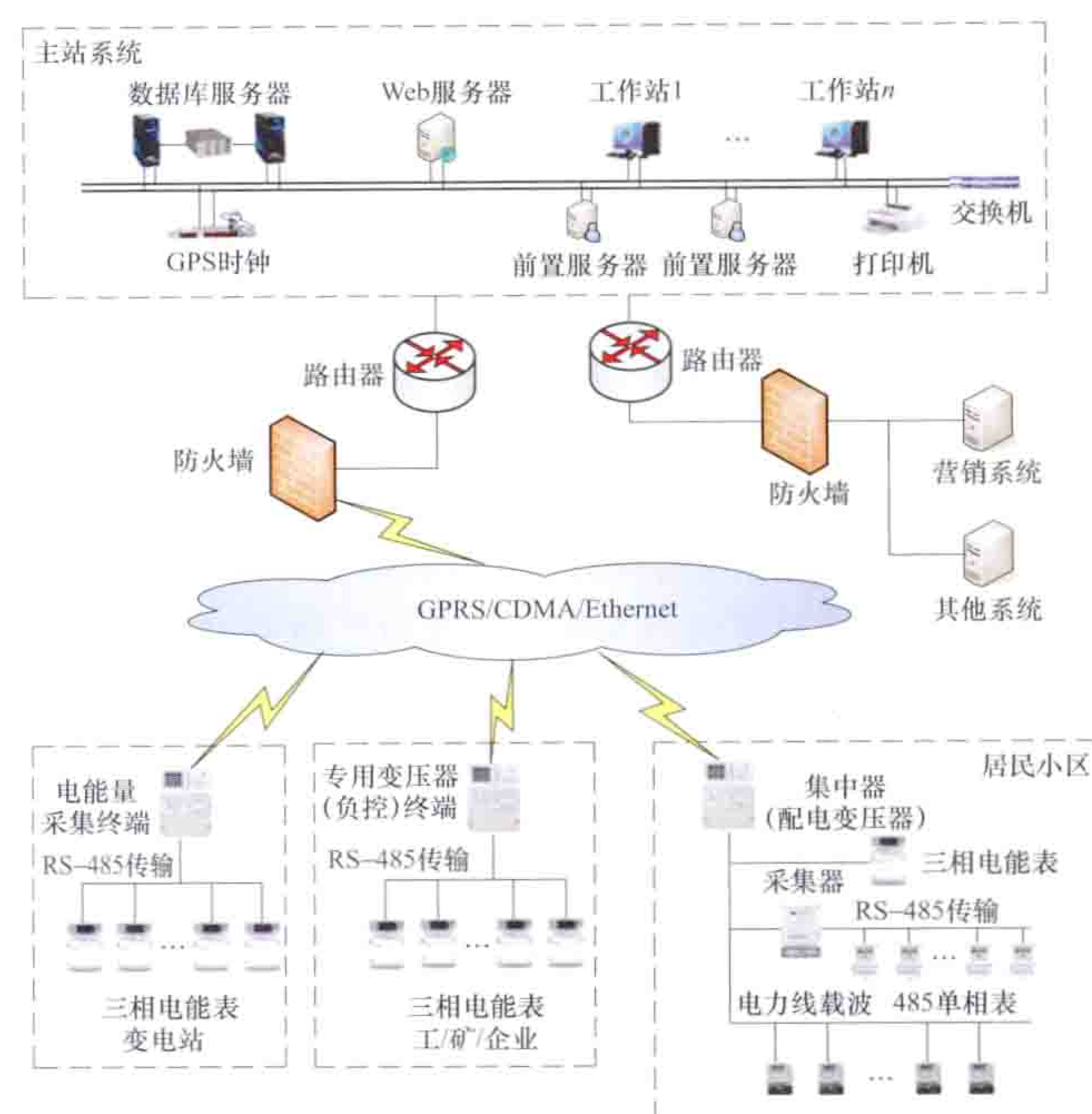
系统构成 用电信息采集系统由系统主站、用电信息采集终端、主站与终端间的通信信道及用户侧电能表及配电开关等配套设施组成，如图所示。

系统主站 由计算机、网络、软件、通信等软硬件构成的信息平台，是用电信息采集系统的核心。在对终端实现数据收集和负荷控制的基础上，实现多维度的数据分析和挖掘、数据处理与共享，为实施需求侧管理提供技术支持，为电力营销应用系统提供数据输入，为电力营销业务管理提供服务。

用电信息采集终端 整个系统的执行端，完成对用户端的电能表实时用电数据、计量工况、事件的采集和用户负荷的控制操作，及时向系统主站传送采集的数据和信息。采集终端包括采集器和集中器。采集器下可挂多块电能表，集中器下可挂多个采集器。根据通信传输媒质可分为有线终端和无线终端。

通信信道 连接主站和终端之间的通信介质、传输、调制解调、规约等的总称。中国一般有230MHz无线专网信道、GPRS/CDMA、3G无线公网信道、微波信道、光纤信道等。

配套设施 包括用户侧电能表、配电开关等。用户侧电能表主要负责本地电能计量，其通信协议应与主站系统兼容，从而实现电能信息的采集与监控；配电开关设备主要有断路器、隔离开关、负荷开关等。用电信息采集与监控终端通过电能表和配电开关设备实现对用户用电的遥控。



用电信息采集系统构成

主要功能 用电信息采集系统的主要功能有数据采集、数据管理、远程控制、运行维护管理等。

数据采集 数据采集功能模块的主要任务是编制自动采集任务（包括任务名称、任务类型、采集群组、采集数据项、任务执行起止时间、采集周期、执行优先级、正常补采次数等），执行采集任务，检查执行情况。采集的主要数据项有：①电能量数据，包括总电能示值、各费率电能示值、总电能量、各费率电能量、最大需量等；②交流模拟量，包括电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等；③工况数据，包括采集终端及计量设备的工况信息；④电能质量越限统计数据，包括电压、电流、功率、功率因数、谐波等越限统计数据；⑤事件记录数据，包括终端和电能表运行工况的重要事件记录数据；⑥其他数据，如费控信息等。

数据采集的主要方式有：①定时自动采集，按采集任务设定的时间间隔自动采集终端数据；②随机召测，根据实际需要随时人工召测数据；③主动上报，在全双工通道和数据交换网络通道的数据传输中，允许终端启动数据传输过程，将重要事件立即上报主站，以及按定时发送任务设置将数据定时上报主站。

数据管理 数据管理功能模块主要包括数据合理性检查、数据计算分析、数据存储管理和数据查询等。①数据合理性检查针对采集数据的完整性、正确性开展，发现异常数据或数据不完整时，系统自动进行补采。②数据计算分析则根据管理应用的需要，对采集的原始数据按不同频度和维度进行计算、统计和分析，如：按区域、行业、线路、自定义群组、单客户等类别，按日、月、季、年或自定义等时间段进行负荷、电能量的分类统计分析；对监测点的电压、电流、功率因数、谐波等电能质量数据进行越限、合格率等电能质量数据的统计与分析；线损、变损、母线不平衡等的计算、统计与分析等。③数据存储管理是采用统一的数据存储管理技术，对采集的原始数据和加工数据进行分类存储和管

理，为数据中心及其他业务应用系统提供数据共享和分析利用。④数据查询指系统支持各类原始数据、加工数据的组合条件综合查询，为管理提供信息支撑。

远程控制　远程控制功能模块主要任务：①根据管理需要，对终端设置功率定值、电量定值、电费定值。②配置并管理相关参数。③下达控制命令，实现系统功率定值控制、电量定值控制和费率定值控制功能。

运行维护管理　运行维护管理功能模块有系统对时、权限和密码管理、采集终端管理、档案管理、通信和路由管理、运行状况管理、维护及故障记录和报表管理等。①系统对时。支持系统与标准时钟对时，并支持从其他系统获取标准时间。主站可对系统内全部终端进行广播对时或批量对时，也可以对单个终端进行对时。②权限和密码管理。对系统用户进行分级，实施操作系统、数据库、应用程序的用户密码设置和权限分配。③采集终端管理。对采集点及终端档案参数、配置参数、运行参数、运行状态等进行管理。④档案管理。对维护系统运行所必需的电网结构、用户、采集点、终端设备进行分层分级管理。⑤通信和路由管理。对系统中的通信设备、中继路由参数等进行配置和管理。⑥运行状况管理。对主站、终端、专用中继站运行进行状况监测和操作监测。⑦维护及故障记录。自动检测主站、终端以及通信信道等运行情况，记录故障发生时间、故障现象等信息，生成故障通知单，提示标准的故障处理流程及方案，并建立相应的维护记录。⑧报表管理。提供专用和通用的制表功能。

yongdian xingzhi

用电性质　(load nature of electricity consumption)

用户消费电能所具有属性的统称。用电性质既反映用户用电过程中的客观规律，也反映用户用电对供电的基本要求，是供电企业经济合理地确定供电方式、选用合适的电能计量方式和相应电价以及进行用电负荷管理和用电负荷调整、改善供电质量、提高服务水平的依据。用电性质不同，对供电质量的要求和影响也不同，用电负荷在电网用电负荷曲线中所处的位置也有差异，因而在电力系统调度、供用电管理和服务上也有区别。

用电性质主要包括用电负荷的电特性、对停电的敏感性、用电的时间特性、服务场所与环境等。

用电负荷的电特性　用电负荷电特性是指电能转换的形式和转换所使用的器械的属性以及它们对供电质量产生的影响。感性、容性负荷影响电压偏移和无功负荷潮流；冲击负荷影响电压闪变；不对称负荷影响三相电压不平衡和波形畸变；非线性负荷向电网输送谐波，引起谐波污染。用电负荷的电特性是负荷管理的重要内容和确定供电方式的重要依据。

对停电的敏感性　用电负荷对停电的敏感性即用电负荷的重要程度。它是指突然停电对用户用电产生不良后果的影响度。不同用电负荷突然停电产生的影响度不同，影响程度越严重，要求的供电可靠程度越高。因此，按用电负荷对停电的敏感性进行负荷分级，即用电负荷级别，具有一级、二级负荷的用户，即为重要用户。用电负荷对供电可靠性的要求取决于用电负荷级别，它是选择供电方式的重要条件，也是电网调度运行管理的重要依据。

用电的时间特性　用电的时间特性反映用户用电的时间需求，是用电负荷管理和安排供电设备计划检修应考虑的重要因素。它一般指季节性用电、连续性用电和非连续性用电等。①季节性用电。农业排灌、脱粒、打场，夏季防暑降温，冬季保温采暖等用电。这类用电负荷集中在某一段时间内用电较多，而在其他时间不用或很少用电，引起年负荷的不均衡性。②连续性用电。主要是三班连续生产的企业、车间、机台的用电。除了设备检修停运外，其余时间都在用电，负荷较为平稳。③非连续性用电。这类负荷因用电时间的不均衡，引起日、月、年负荷的不均衡，一般都是可调整的塑性负荷。大型政治或社会活动、重要科学试验及节日用电等负荷，虽然用电时间不长，但其对供电可靠性的要求较高，是非塑性负荷，不可调整。

服务场所和环境　服务场所与环境与社会公共安全密切相关，这类负荷包括车站、机场、医院、计算机中心、矿井、电梯、广播电视、地下铁道、电气化铁路、自来水等用电需求，涉及社会与人身安全，对电能质量与供电可靠性也有较高的要求。

yongdian zuida xuliang

用电最大需量　(maximum demand of electrical load)

规定时段内用户从电网中取用的平均电功率的最大值。用电最大需量反映了用户对电力需求的最大程度，供电企业为满足用户的需求，必须备有大于用电最大需量的供电能力。因此，用电最大需量通常用作计算用户基本电费的依据之一。平均电功率常以10、15、30min内瞬时功率的平均值为准。少数国家的电功率取视在功率值（如英国），大部分国家取有功功率值（见用电负荷）。用电最大需量可用需量表测量记录。

中国以15min的平均有功功率最大值作为用电最大需量，并规定30、60min平均最大有功功率的折算系数分别为1.04～1.1和1.06～1.15。

yonghu

用户　(power customer)　某种技术、产品或服务的使用者。对电力供应而言，用户即为电能产品的消费者。任何单位或个人要使用电能，都需要向供电企业提出申请，并依法办理相关手续且签订供用电合同后，即成为用户，又称客户。

为便于管理，供电企业通常将用户进行分类。法国、日本等国家将用户分为电灯用户与电力用户两大类。中国一般根据管理的需要和方便，可从供用电关系、销售电价、供电电源特性、用电时间特性或负荷特性等不同视角对用户进行分类。

按供用电关系分类　有直供用户、非直供用户（包括趸售用户、转供电用户）。

（1）直供用户。与供电企业建立直接抄表收费合同关系的用户。

（2）趸售用户。从供电企业趸购电能，再将电能转售给消费者，以取得经营利益的企业。趸售用户对趸出电能的供电企业来说，是供电企业的直供用户，但对趸售营业区内的

电能消费者来说，又是供电企业。

（3）转供电用户。在供电企业的公用供电设施尚未到达或供电能力不足的地区，为解决该地区其他消费者的用电，供电企业以委托代理的方式请该地区有供电能力的直供用户，就近向其他消费者供电。受委托的直供用户即称转供电用户，由转供电用户供电的其他电能消费者称为被转供电用户。被转供电用户与直供用户享有同样的用电权利与义务，但承担供电义务的是转供电用户。

按销售电价分类　有居民生活用户、非居民照明用户、商业用户、非工业用户、普通工业用户、大工业用户、农业生产用户、贫困县农业排灌用户、趸售用户。

（1）居民生活用户。按居民生活电价结算电费的用户，主要是指仅有家庭生活照明和家用电器用电的城乡居民用户。

（2）非居民照明用户。按非居民照明电价结算电费的用户，主要是指其他非生产场所的照明和空调用电，信号、装饰和广告用电，道路照明用电，以及用电容量不足3kW的医疗器具用电等的用户。

（3）商业用户。按商业电价结算电费的用户，主要是指从事商品交换或提供商业性、金融性等有偿服务的照明用电用户，包括商业销售业，物资供销、仓储业，文化娱乐场所以及宾馆、饮食服务业等。

（4）非工业用户。按非工业电价结算电费的用户，主要是指用电容量在3kW及以上，属于科研实验性或非工业性用电的用户，包括非工业性电力拖动、电加热、电解和电化学等动力用电，交通运输、通信广播、基建施工以及营业性文化设施用电等。

（5）普通工业用户。按普通工业电价结算电费的用户，主要是指受电变压器容量在315kV·A以下，或低压受电的工业性生产用电，包括工业生产用电、事业性单位附属工厂生产用电、交通通信等修配厂用电、城镇自来水厂用电等。

（6）大工业用户。按两部制电价结算电费的用户，主要指受电变压器容量在315kV·A及以上的工业生产用电，包括工业生产用电、事业单位附属工厂生产用电、交通通信等修配厂用电、自来水厂用电等。

（7）农业生产用户。按农业电价结算电费的用户，主要指农业养殖业和种植业用电，包括农田排涝和排灌用电，田间作业、打井、脱粒、育苗用电，非营业性农民口粮加工和饲料加工用电，渔业、畜牧业用电等。

（8）贫困县农业排灌用户。国家对贫困县的农田排涝和排灌用电给予优惠政策，这些用户按较低的贫困县农业排灌电价结算电费。

按供电电源特征分类　有高压用户、低压用户、双电源用户、专线用户等。

（1）高压用户。以3kV及以上电压供电的用户。高压用户大多数自备一台或数台受电变压器。大工业用户一定是高压用户。

（2）低压用户。以0.4kV及以下电压供电的用户。低压用户都无受电变压器，由公用配电变压器或转供用户配电变压器供电。

（3）双（多）电源用户。有两个或两个以上独立电源供电的用户。

（4）专线用户。有一条或两条以上供电线路专线供电的用户。专线用户通常采用高压供电的方式。

按用电时间特性或负荷特性分类　有临时用户、季节性用户、重要用户等。

（1）临时用户。用电时间短暂，一般不超过6个月的用户。

（2）季节性用户。一年之中，用电的时间随季节呈规律性变化的用户。

（3）重要用户。有用电负荷级别分类标准中规定的一、二级重要负荷的用户。

yonghu diangong guanli

用户电工管理　（management on customer's electrician）

对从事用户电气设备安装、保养、操作、运行维护和检修的人员开展培训、考核及日常督查的活动。电工是一种特殊工种，其作业技能有很强的专业性，对作业的安全保护有特殊的要求。为了提高用户电工的作业技能和安全保护的水平，必须对电工进行专门培训，考核合格取证后，才准上岗作业。

中国从20世纪50年代中期起，各级电力部门对工矿企业电工开始进行技术培训和安全教育。60年代中期，对农村电工也着手进行培训。经过50多年的努力，对用户电工管理已形成一套综合性的专业管理办法和措施，对避免和减少用户电工触电伤亡和电气事故，保障供用电双方财产安全，保障生产和社会的发展发挥了很大作用。1992年能源部发布了《进网作业电工管理办法》（第9号令），使中国用户电工的管理步入法制管理的轨道。2005年，国家电力监管委员会颁布了《电工进网作业许可证管理办法》，明确由国家电力监管委员会负责组织全国电工进网作业许可考试，指导、监督全国电工进网作业许可证的颁发和管理。

用户电工按作业电网电压和作业对象的不同，可分为低压电工、高压电工、特种电工三类。低压电工和高压电工又分为安装电工、维修电工和运行（值班）电工。安装电工与维修电工按作业环境的不同分为外线工、内线工、变电工。特种电工可分为电气试验工、二次安装工、仪表工、电缆工、调度工等。用户电工管理的主要内容包括电工基本条件审查、培训、考核、发证和日常管理。

电工基本条件审查　由于电工作业的特殊性，对接受电工培训的人员在文化、身体健康等方面有统一的要求。其基本条件应是年满18周岁，且男性不满60周岁、女性不满55周岁，身体健康、无妨碍电工作业的病症和生理缺陷，具有初中及以上文化程度且工作认真负责的人员。对经过审查符合上述条件并申请参加电工培训的人员，可以参加电工培训。

电工培训、考核和发证　电工的培训按作业电网电压与作业对象不同而分别进行，注重作业安全和作业实际能力的提高。①培训内容。电气基本理论知识，电力系统运行基本知识，电工作业安全知识，电工作业技能以及电工作业标准、规程、制度。②培训时间。一般低压电工不少于100学时，高压电工不少于160学时，特种电工不少于120学时。③培训方式。一般采用课堂讲课、电化教学、现场教学、作业演示、作业实习等。承担培训任务的单位须具备完成教学任务的场地、设施、教员和教学制度；承担培训任务的教员应具有较高的专业基础理论知识和作业技能以及教学经验。

④考核发证。电工进网作业许可考试实行全国统一大纲、统一命题、统一组织。考核包括笔试和实际操作两部分，经考核合格者，发给作业许可证，可以独立上岗作业。

电工日常监督管理　主要内容有：①每隔1～2年进行一次资格复审，检查电工身体健康状况的变化、作业行为和作业规定熟知程度以及进行新的作业技能的再教学，经复审合格者，电工资格继续有效。②深入用户现场对电工作业行为、作业现场安全保障措施进行检查。③对违反作业安全规定者或造成事故者给予教育或处罚。④办理工作单位、工种变更等事宜。

yonghu dianli diaodu guanli

用户电力调度管理　（dispatching management for customers）　为用户电气设备及配电系统安全运行而开展的组织、指挥、指导和协调工作。为保障整个电力系统的安全、优质、经济运行，对用户的电气设备及配电系统运行实施电力调度管理，是一项十分重要的工作。

需要实行电力调度管理的用户一般包括：①受电电压在35kV及以上的用户（个别地区包括10kV专线用户）；②有多电源供电、受电装置的容量较大且内部接线复杂的用户；③有两回路及以上线路供电，并有并路倒闸操作的用户；④有自备电厂（或根据机组容量划分）并网的用户；⑤用电性质重要或对供电质量有特殊要求的用户；⑥其他根据需要确定直接调度的用户等。用户电力调度管理的内容主要有签订调度协议、用户电力调度值班员管理、运行操作管理、用户负荷管理和计划检修管理等。

签订调度协议　实行电力调度管理的用户，在接电前，需与供电企业的调度机构签订调度协议，明确双方调度的范围与责任。

用户电力调度值班员管理　属于电力调度管理的用户，应按要求配备用户内部的电力调度值班员。对用户电力调度值班员的基本要求是：①熟悉掌握电力调度规程的有关规定以及双方签订的有关协议或合同；②熟悉调度管理的基本制度并掌握调度范围、运行操作术语等基本知识；③熟悉本单位电气设备性能与接线；④具有直接指挥本单位配电系统运行操作和事故处理的实际能力。用户的电力调度值班员需取得电力监管部门颁发的电工进网作业许可证后才允许上岗。

运行操作管理　按调度协议规定对用户电气设施进行操作的控制工作。运行操作对用户供电可靠性和电能质量以及电力系统的安全至关重要。用户自备电厂或多电源的并列、解列，供电线路与主变压器的停电、送电，受电变电站一次母线接线方式改变，主变压器改变分接头，中性点接地方式改变，继电保护装置的投入、退出，检修前挂接地线或竣工后拆除接地线等，都需要操作一定的设备。按调度协议，操作属于电网调度机构管理的电气设备，在操作前用户需向电网调度机构提出申请，经电网调度机构同意，用户才可根据调度管理规程要求进行变更运行方式的操作，并做好相应的记录，以备查核。

用户负荷管理　针对用户用电负荷的多样性和随机变化的特征，编制电力系统的运行方式，有功、无功电力的平衡计划以及缺电或事故状况下的计划限电或事故限电的序位表。用户需按年度、季度、月度安排用电计划，并向电力调度机构报告前月实际负荷与当月负荷预计。当用户内部发生故障而降低负荷时，用户要及时向电力调度机构报告负荷变化和恢复情况；当需要起动大容量设备、停止保安用电线路、变动保安负荷等操作时，也要事前与电力调度部机构取得联系，以便于采取相应的调整措施。

计划检修管理　为避免重复停电，减少停电的时间，发、供、用电设备的计划检修要统一安排。用户根据本单位的生产安排和设备健康状况，事先向电网企业提出年度设备检修时间，检修设备，检修期间的负荷、电量。电网企业根据电网设备健康状况，综合考虑安排每月的停电检修计划，并以书面或其他方式通知用户，以便相互配合。电力系统临时检修，应尽可能提前通知用户。对事故断电，电网企业要组织力量抢修，尽快恢复供电。电网企业计划检修一般利用节假日、轮休日或电网低负荷时段进行。

yonghu dianqi shigu guanli

用户电气事故管理　（electrical failure management for customers）　对用户发生的电气事故进行调查、分析，帮助和指导用户正确开展事故应急处置，并提出防范对策的活动。用户内部供用电设备发生电路故障或电路失去控制的事件，称为用户电气事故。用户发生电气事故，不仅直接给用电者的生产、人身安全和财产安全带来损害，而且有的事故可波及电力系统，造成电力系统中其他用户断电或危及电工作业人员的人身安全。纳入用户电气事故管理范围内的事故有用户影响电力系统的事故、全厂停电事故、重大电气设备损坏事故、反送电事故、人身触电伤亡事故、电气火灾事故、专用线跳闸事故。

用户电气事故管理是用电安全管理的重要内容之一。其目的是查明事故发生的原因，分清造成事故的责任，分析事故发生的特点和规律，提出反事故措施，防止同类事故再次发生。

事故调查要遵循的流程和方法：①到达事故现场后，首先听取事故当事人对事故过程的介绍，对照现场弄清事故发生的全过程，然后在保证安全的前提下才可开始现场检查和现场调查。②现场检查时要检查自动保护装置动作指示情况，查阅发生事故前后有关记录，如气象、运行工况、运行记录以及试验、检修、缺陷记录等，查看事故设备损坏部位和损坏程度，有必要时，可对自动保护装置如继电保护、防雷设备等进行复试检查，为事故分析判断提供可靠依据。③要搞清楚事故类型，事故当事人基本情况及应负的责任，事故设备名称、型号及损坏部位与损坏程度，找出事故直接原因和波及范围，事故发生的时间和恢复送电时间，事故造成的直接经济损失情况等。

事故分析要在事故事实清楚，证据充分的基础上进行：①广泛听取意见，可以召集有关人员对事故进行分析。②以事实为依据，以技术标准、管理制度为准则，找出事故的真正原因，分清事故责任，寻找出技术上、管理上的漏洞。③总结应吸取的教训，提出反事故对策，防范类似事故重演。

对用户提出的具有典型普遍教育意义的事故报告，应当通报其他用户以利于所有用户从中吸取教训，进一步做好用电安全管理工作。

yonghu dianqi shiyan

用户电气试验 (test of customer's electrical installations) 对用户电气设备和电气安全用具的电气性能进行的检查测试。用户电气试验是用电安全管理的重要内容之一。用户电气设备在运输安装、检修后以及使用过程中，都要按规定进行电气试验，检验电气设备设计、制造、安装、检修等安全性能和质量，判断设备的可用性。电气设备及元器件、绝缘工器具等电气安全用具的电气性能都符合技术要求的，才能安全可靠使用。由于电气设备种类繁多，功能各异，适用环境也不一样，不同种类的电气设备的电气试验项目、试验标准及试验周期也有所差别。用户电气设备应进行的电气试验有交接试验、预防性试验、检修试验和事故分析试验。

交接试验 电气产品经过运输、安装竣工后进行的试验，目的是验证安装质量。试验合格后，方可正式移交生产单位运行。交接试验一般由施工安装单位承担。交接试验报告及记录应提交工程验收的临时组织查核。验收合格后再将试验报告及记录转交生产单位存档备查。

预防性试验 按国家标准规定的期限对运行中的电气设备进行的试验，目的是验证运行中的电气设备有无隐患，以便采取措施，确保运行安全。预防性试验是运行中的监督性检查，是保证运行安全的一项重要措施。用户高压电气设备的预防性试验，一般由电力监管部门认可的有试验资质和能力的单位承担或由用户委托电力部门进行试验。各类电气设备预防性试验的项目、周期、标准须符合有关电气设备预防性试验标准的要求。

检修试验 电气设备检修或修理后进行的试验，目的是验证检修或修理后设备的质量。试验的项目随检修或修理的对象而定，试验的标准须符合有关电气设备预防性试验标准的要求。

事故分析试验 为判断发生事故以后设备损伤程度和性能异变情况而进行的试验，目的是验证设备可用性并为事故分析提供依据。

yonghu dianya wugong guanli

用户电压无功管理 (voltage and reactive power management for customers) 为提高用户电压质量，保持无功电力平衡，保证电网稳定、经济运行和用户用电设备正常运行而开展的活动。无功就地平衡是保证用户电压质量、减少电力系统有功消耗的重要条件。电力系统无功功率平衡程度及其随机调节性能，直接影响电力系统电压质量的优劣程度，加强用户电压无功管理是实现无功就地平衡的重要措施。

与电网连接的用户电力设备是电力系统的组成部分，用户受电端电压质量的优劣除与电网结构、电源配置、运行方式及无功调节能力等因素有关外，还与用户自身的负荷特性、无功补偿方式、用电容量及调节能力有关。无功功率严重不足或配置不当，会引起电力系统或局部电网出现低电压运行状况，使电气设备性能降低，电能损耗增加、寿命缩短、生产效率下降，电力系统抗御事故冲击能力减弱，对电力系统的安全稳定运行构成潜在的威胁。无功功率调节手段不足或调节能力差，会加剧电压偏移和电压波动的程度，出现高峰负荷时段电压偏低，低谷负荷时段电压过高，如是周期性冲击负荷，则会引起闪变。因此，做好电力系统无功功率的平衡和有效调节工作与用户电压无功管理，都是保证供电电压质量的基础工作，也是提高电力系统安全稳定运行的重要措施。

为加强用户电压无功管理，世界大多数国家在规定供电电压质量标准的同时，对用户的用电功率因数也做出相应的规定并实施相应的经济奖惩措施。中国采用按功率因数来调整用户电费（见功率因数调整电费）的方法，达到激励用户进行无功补偿，提高电压质量的目的。用户电压无功管理主要包括电压质量监督、无功管理和改善电压质量等三个方面的工作。

电压质量监督 用户受电端的电压质量要符合国家规定的标准（见供电质量）。对用户电压质量的监督一般采用数理统计的方法，开展用户端电压监测点选择、实测及统计对比分析。①电压监测点的选择应考虑具有代表性，在整个供电区域内每级电压中呈现均匀分布并能满足数理统计的数量要求。选择的用户端电压有可能出现最差的质量，如供电线路首端或末端的用户。②对用户受电端电压进行实测的方法有电压自动记录仪、人工定时实测等。人工定时实测的日期、时间应具有可比性，最好在同一日期时间内监测。③对用户端电压的实测数据的统计分析与电网电压监视中枢点监测数据进行对比分析，并将分析结果反馈给供电企业运行部门，用以指导无功管理与电压的调整。

无功管理 用户无功的管理分为接电前和运行中两个阶段。对新装用户在接电前进行无功管理的目的，是使用户在用电以后有尽可能高的自然功率因数、经济合理的调压方式与无功补偿措施。接电前无功管理的主要内容包括：①指导用户正确选择机电设备，做到匹配合理；②合理选择变压器容量、调压方式、调压范围和每级调压幅度；③在进行无功负荷计算的基础上，经技术经济比较确定无功补偿方式、容量及调整方式以及配置的方案。

运行中对用户进行无功管理的目的是在保证电压质量的前提下，使用户的无功实现就地平衡。运行中无功管理的主要内容：①指导用户按电压或功率因数自动投切无功补偿设备，做好无功设备的运行维护；②在无功补偿设备全部投入，仍不能保证电压质量时，应采取调整变压器分接头等调压措施。

改善电压质量 用户端电压质量不符合规定时，要分析引起电压质量不合格的原因与责任，并采取相应改善电压质量的措施。责任属于供电企业的，供电企业应根据电力系统情况，采取有效的调压措施。调压措施有：①增减无功功率进行调压，如增减发电机、调相机、并联电容器、并联电抗器的无功功率等；②改变有功和无功潮流分布进行调压，如采用调压变压器、调整变压器分接头；③改变网络参数进行调压，如投入或切除串联电容器、停或投并列运行变压器台数。责任属于用户的，用户可针对性地采取改善措施。如线路电压损失过大，应更换为大截面导线或增加供电回路；如无功功率消耗太多，则应增加无功补偿容量或合理选配机电设备，停用或限制空载设备，提高自然功率因数；电网电压在上限运行，用户电压质量仍不合格时，要采用调整变压器分接头来调压；对电压质量有较高要求的用电设备，则应加装自动调压装置等。

yonghu fuhe jisuan

用户负荷计算 (customer's load calculation) 为用户的供配电工程设计而进行的电功率需求量测算。用户负荷计算结果的准确与否将影响设备选择、工程造价及建成投产后供配电系统的安全、经济和合理运行。计算负荷偏小，将使导线、开关设备和变压器在运行中产生过热，增加电能损耗，引起电气设备绝缘老化。计算负荷偏大，将增加各种供电元件的容量，增加建设投资且使大量设备不能充分利用，造成极大浪费。

计算步骤 从计算单台和成组电气设备的计算负荷开始，再计算车间干线负荷和车间变电所的变压器损耗以及用户内部高压线路的损耗，直至计算出用户总降压变电所低压母线上的负荷；然后，加上主变压器及电网供电线路中的功率损耗，即得到用户计算负荷。

计算方法 普遍采用的有需要系数法和二项式法。

需要系数法 需要系数法是最为简单的一种计算方法，也是世界各国普遍采用的计算负荷的基本方法，它适合用电设备较多且容量相差不大的情况。

(1) 单台或多台同类用电设备的计算负荷的计算公式如下

$$P_{ca}=K_{re}P_N \quad (1)$$

$$Q_{ca}=P_{ca}\tan\varphi \quad (2)$$

$$S_{ca}=\sqrt{P_{ca}^2+Q_{ca}^2} \quad (3)$$

式中 P_N 为单台设备额定功率或多台设备额定功率的总和，kW；P_{ca} 为计算有功负荷，kW；Q_{ca} 为计算无功负荷，kvar；S_{ca} 为计算视在负荷，kV·A；K_{re} 为需要系数（见需用率）；$\tan\varphi$ 为功率因数角正切值。

(2) 多台不同类别用电设备的计算负荷（车间变电所的计算负荷）的计算公式为

$$P_{ca}=K_{\Sigma P}\sum K_{re}P_N \quad (4)$$

$$Q_{ca}=K_{\Sigma Q}\sum K_{re}P_N\tan\varphi \quad (5)$$

$$S_{ca}=\sqrt{P_{ca}^2+Q_{ca}^2} \quad (6)$$

式中 $K_{\Sigma P}$ 为有功同时率，可按不同的车间类别由表得到；$K_{\Sigma Q}$ 为无功同时率，一般与 $K_{\Sigma P}$ 相同。

需要系数法使用的同时率 $K_{\Sigma P}$

应用范围		$K_{\Sigma P}$
确定车间变电所低压母线的最大负荷时所采用的有功负荷同时率	冷加工车间 热加工车间 动力站房	0.7～0.8 0.7～0.9 0.8～1.0
确定配电所高压母线的最大负荷时所采用的有功负荷同时率	计算负荷小于5000kW 计算负荷为5000～10 000kW 计算负荷超过10 000kW	0.9～1.0 0.85 0.8

(3) 车间低压的总计算负荷。首先求出车间用电设备的总装接容量，按式(1)～式(3)计算出相应的计算负荷 P_{ca}、Q_{ca}、S_{ca}。此时 P_N 为车间低压用电设备总装接容量，kW。

(4) 全厂的总计算负荷。已知全厂用电设备的总装接容量，包括高压和低压用电设备，也可按式(1)～式(3)计算出相应的计算负荷 P_{ca}、Q_{ca}、S_{ca}。此时 P_N 为全厂用电设备总装接容量，kW。

二项式系数法 二项式系数法的出发点是考虑大容量设备的作用，它不仅考虑用电设备组的平均负荷，而且考虑少数容量最大的设备投入运行时对总计算负荷的影响。因此，当用电设备组用电设备台数较少且容量差别较大时，用二项式系数法可以得到较为准确的结果。其经验公式为

$$P_{ca}=bP_{in}+cP_n \quad (7)$$

式中 bP_{in} 为用电设备组的平均负荷；P_{in} 为用电设备组的设备容量；cP_n 为用电设备组中 n 台容量大的设备运行时的附加负荷；P_n 为 n 台最大容量设备的总容量；b、c 为二项式系数。

yonghu jidian baohu guanli

用户继电保护管理 (relay protection management of customers) 为了确保用户继电保护装置正确可靠动作而开展的活动。电力系统继电保护的基本任务是当电力系统发生故障或异常工况时，在可能实现的最短时间和最小区域内，自动将故障设备从系统中切除，或发出信号由值班人员消除异常工况根源，以减轻或避免设备的损坏和对相邻地区供电的影响。为了预防当用户内部发生电气事故时，可能因用户继电保护装置配合不当或拒动，迫使电网继电保护动作，造成越级跳闸而扩大事故范围，引发电网安全事故，供电企业必须对用户的继电保护进行管理。

根据电力系统继电保护的任务，用户继电保护装置必须具备5个基本性能：①安全性。不该动作时，不误动。②可靠性。该动作时，不拒动。③速动性。能以最短时限将故障或异常从系统中切除或隔离。④选择性。在自身整定的范围内切除故障，保证最大限度地向无故障部分继续供电，不越级跳闸。⑤灵敏性。指保护装置的反应能力。

供电企业对用户继电保护管理的内容有：

(1) 继电保护方案审核。在新建扩建用户受电工程时，对用户受电装置的继电保护方案进行审核。

(2) 定值管理。计算确定或审定用户的继电保护整定值。用户受电装置的进出线、主变压器、母线等的继电保护装置整定值，一般由供电企业计算确定后通知用户。用户内部其他元件的继电保护装置定值可由用户自己计算确定，亦可委托供电企业计算确定。用户受电装置发生改变，需要改变继电保护定值时，属于供电企业管辖的继电保护装置，要事先通知供电企业，在继电保护重新计算整定以后，方可改变受电装置的运行方式。当电力系统运行方式改变时，供电企业需向用户提供继电保护装置整定计算所需的系统参数。

(3) 调试检验管理。供电企业需参与用户供电工程接电前的继电保护装置的调试检验工作。为保证用户继电保护动作准确可靠，不仅对新投入的继电保护装置要进行检验，而且对已投入运行的继电保护装置也要按周期进行检验。调试检验项目与周期按规程规定的要求进行。用户受电装置的进口继电保护检验，一般由供电企业承担，用户内部继电保护的检验由用户自己承担，也可委托供电企业或有调试能力的单位承担。调试检验要做好记录，调试检验中发现的异常情况要及时排除，并将检验结果写成书面报告送交运行单位备查。供电企业还要参与用户事故扩大、继电保护误动时的临

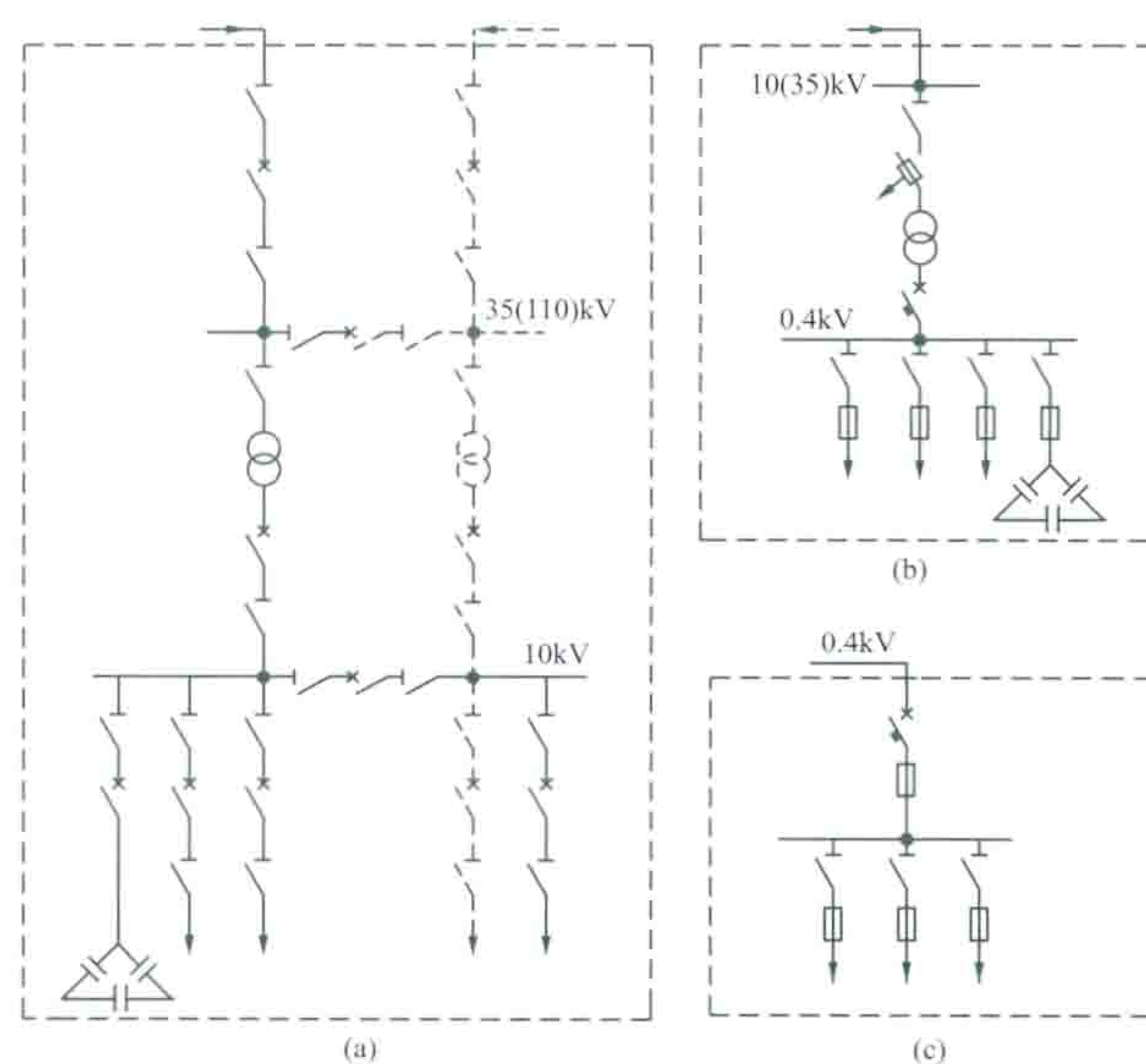
时性检验工作。

(4) 日常管理。统一编制用户继电保护定期检修计划和反事故措施，并组织实施，指导用户搞好继电保护日常运行工作，对用户继电保护专职人员进行技术培训等。

yonghu shou (song) dian zhuangzhi

用户受（送）电装置 [customer's installation to obtain or provide electricity from (to) the network] 与电力系统供电网有直接电联系的用户电气设备组合体。用户为了使用电能而建设的能够直接从电力系统供电网受电，并具有控制、变换（转换）、分配等功能的电力设施统称为用户受电装置。用户拥有一定的发电能力（如自备发电厂）并有向电力系统供电网输送电力功能的电力设施则为用户送电装置。这类装置一般包括开关，变压器，电抗器，电容器，继电器，指示和测量仪表，控制电器，一、二次回路及其他附属设备等。用户受（送）电装置与电力系统供电网有直接的电联系，是电力系统的重要组成部分，其设计、施工、运行质量直接影响公用电网安全运行和供电质量。因此，它是供电企业用电检查的重点。

用户受（送）电装置按其受电电压和功能分为用户高压变电站、用户高压配电室、用户低压配电室、用户低压配电盘等，其代表性接线如图所示。



用户受（送）电装置接线［虚线框内为用户受（送）电装置电气设备的组合］
(a) 用户高压变电站；(b) 用户高压配电室；(c) 用户低压配电室（盘）

yonghu xiebo guanli

用户谐波管理 (harmonic management of customers)

为预防、控制用户用电设备产生的谐波引起电能质量问题而开展的活动。随着非线性用电设备在电网中的大量投运，谐波分量所占比重越来越大，供电网的电能质量问题突出，不仅造成电网保护装置和自动化装置的误动与拒动，威胁电网的安全运行，而且直接影响工业产品质量和用电设备使用寿命，增加电网的供电损耗（见供电质量）。因此，用户谐波管理是电能质量管理的重要内容之一。

谐波源 谐波是由具有非正弦电流特性的电气设备产生的，这类电气设备称为谐波源，主要有：①装有电力电子元件的电气设备，如硅半导体整流器或晶闸管整流器、变频器、逆变器、变流拖动装置（变频、变压调整装置）、电力机车、电视机、电力系统的换流设备；②具有非线性电流、电压特性的电气设备，如感应炉、感应加热装置、电弧炉、石墨化电极炉、气体放电灯、电抗器及小型变压器。

谐波产生的影响 谐波电流在供电网的阻抗上产生谐波电压。谐波电压的大小取决于：①各谐波源产生的谐波电流的幅值与相位；②同时工作的谐波源的数量，用户无功补偿装置的容量；③电网供电点的短路阻抗及电网谐振情况。谐波电压叠加在供电网正弦波形的 50Hz 电压上，并施加于所有接于该供电网的电气设备，将对这些电气设备的正常工作产生影响。如果谐波电压水平超过电气设备抗干扰能力，会导致下列后果：①引起局部过热，使电气设备绝缘加速老化，使绝缘薄弱的电容器和发电机、电动机绕组过早损坏。②干扰电子设备的功能，如对电子计算机、电视广播设备、电子通信设备产生干扰，造成广播通信质量低劣，甚至无法正常工作。③使继电保护、自动装置发生功能错误，如使继电保护误动、音频或无线电控制系统的接收器功能失调。④影响供电网接地短路时的消弧过程。

谐波管理内容 对用户谐波管理的内容主要是接电审查、运行监督和谐波防治等。

接电审查 对用户谐波的管理要以预防为主，做好用户接电前的审查是极重要的一环，目的是控制用户不能将具有非正弦电流特性的设备任意接入电网。接电审查主要是审查用户接入电网使用的电气设备是否是具有非正弦电流特性的设备，即谐波源。如为谐波源时，用户要提供这类设备的型号、容量、运行方式、接线方式、控制方式等资料，以便电力部门按照标准判断该设备是否可以直接接入电网，并经过测算确定该设备接入电网的供电方案。接电审查在用户提出用电申请后确定供电方案前进行。

运行监督 对用户谐波的管理主要体现在运行中的监督。对具有谐波源的新用户，在其受电装置投入运行正式用电后，要在其受电端对用户的谐波电流和谐波电压进行一次现场测量，以验证谐波是否超标。对已运行的大量用户，主要是通过电网中设置的谐波监测点反馈的谐波信息来实施监督。当监测点的谐波超标时，要查明谐波超标的原因和源头。属于用户谐波源引起的，供电企业要协助用户采取措施改善，将谐波控制在允许的范围以内。谐波监测点可视电力系统情况选择在发电厂或变电站母线，也可选在用户受电装置高压侧；可定期进行人工监测，也可装设谐波自动记录仪自动进行监测。谐波具有随机性，谐波的测量时间要选择在谐波最严重的时段进行，一般要选在电网最小运行方式和谐波源产生谐波量最大的时刻。

谐波防治 预防和治理谐波的措施有：①对于那些可能在电网中引起直流分量的设备，如三相零式整流器，不允许直接接入电网，对这类设备可用变压器与电网隔离；②对整流设备，可增加整流相数；③采用滤波措施；④采用并联电容器吸收措施；⑤受电变压器采用 Yd 或 Dy 接

线；⑥加强运行管理，改进工艺，保持三相负荷平衡；⑦增大电网短路容量；⑧调整电网电容器补偿容量，防止因谐振将谐波放大。

yougui dianche

有轨电车 (tram car) 由架空导线供给直流电驱动牵引电动机并带动车辆在轨道上行驶的城市轨道交通。有轨电车是19世纪下半叶在城市马拉（畜挽）轨道车的基础上改进发展起来的一种交通工具。图1所示为城市有轨电车。

简史 1879年柏林工业展览会上展出了世界第一辆以架空导线供电的电动车。1884年美国人C.J.范德波尔（Charles Joseph van Depoele，1846—1892）在多伦多农业展览会上试用电车载客，采用一根有触轮的集电杆及一条架空导线输电，并以钢轨作为回路的供电方式。1888年美国人F.J.斯普拉格（F.J.Sprague）在畜挽轨道车基础上改用电力牵引，并对受流装置、控制系统、电动机的悬挂和驱动方式等进行了改进。1890～1920年间，在世界范围内有轨电车有了很大发展，成为大中城市广泛采用的主要交通工具。20世纪30年代后期，内燃机技术得到不断发展，汽车工业在第二次世界大战后发展迅速，石油产量增长，汽车数量剧增，而有轨电车由于噪声大、机动性差、损坏道路、加重维修等原因，在许多城市逐渐被淘汰。但在这个时期，联邦德国、瑞士、苏联及一些东欧国家仍恢复和发展了有轨电车，并对车辆及运行线路做了改进。70年代以后，由于能源及环境保护的要求，一些国家又对有轨电车重新重视起来。90年代一些发达国家发展了一种快速有轨电车，其最高车速为60～80km/h，可在大城市繁华或狭窄街道的地下或高架轨道上运行，不受其他车辆干扰。



图1 城市有轨电车

中国的有轨电车于1906年始建于天津，随后在上海、大连（见图2）、沈阳、哈尔滨、长春、鞍山等城市相继修建，直至20世纪50年代后期，有轨电车仍然是这些城市的主要交通工具。进入60年代，被公共汽车和城市无轨电车代替。进入21世纪，中国建设的新型有轨电车项目，兼具交通和观赏两大功能。新型有轨电车平均时速20km/H，比城市中公交车平均时速快30%；普遍使用长钢轨，基本没有接头，行驶中车轮与钢轨的摩擦噪声较低。2006年底，天津滨海新区开通了由法国引进的胶轮导向电车，成为中国大陆境内第一个使用胶轮导向电车的城市。2009年，上海浦东新区张江地区也开通了胶轮导向有轨电车。

构成 由走行部分、车厢、电气控制系统、制动设备等组成。

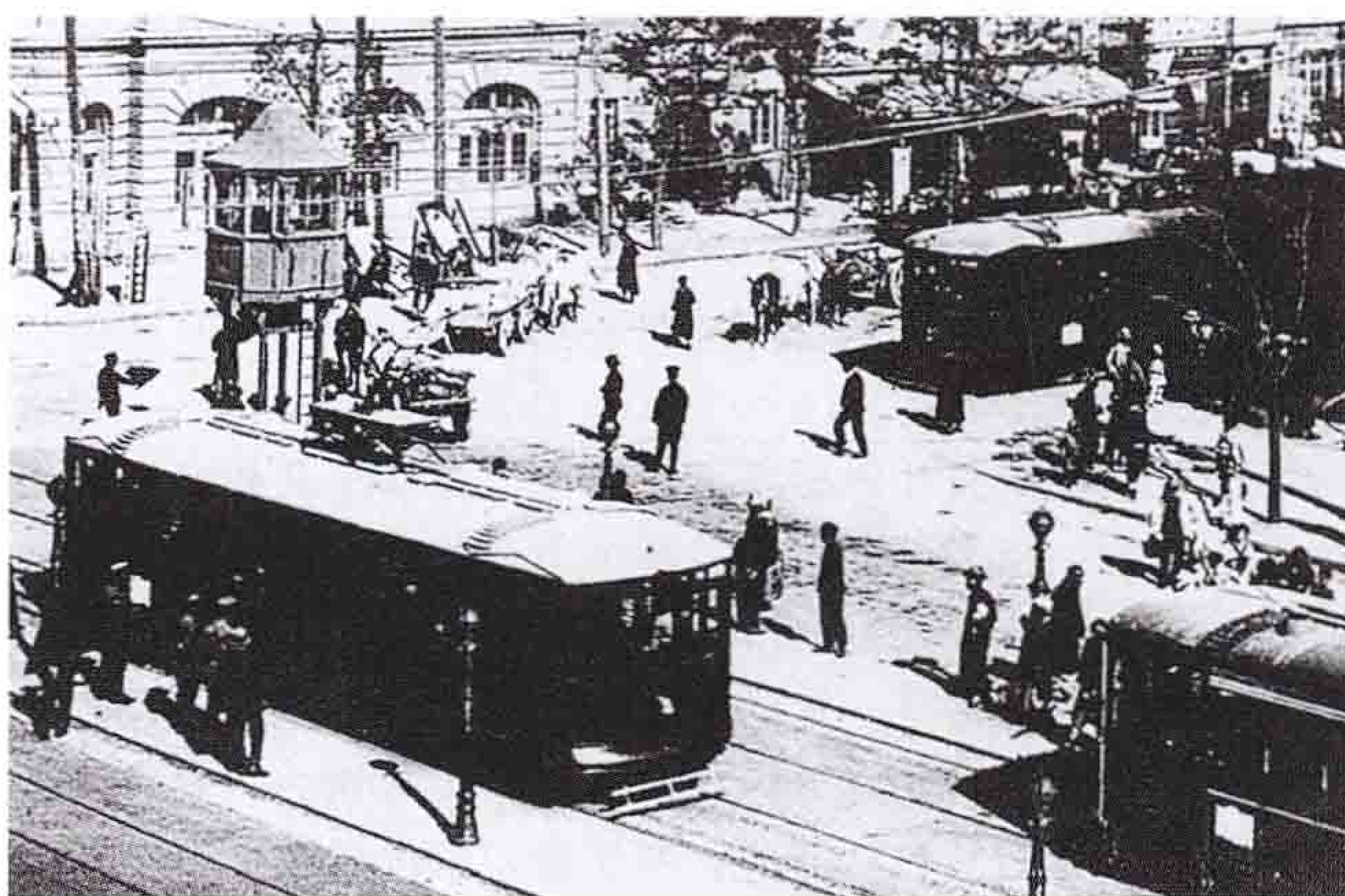


图2 大连市常盘桥有轨电车站［大连地区有电始于清光绪十六年（1890年），为东北之最］

走行部分又称转向架。它由牵引电动机、传动装置和两副轮对等合装为一体。在轮架的中部有立轴与车厢串接，因而轮架能相对于车厢自由转动，有利于转向。单车厢的有轨电车两端各装一台两轴转向架。两车厢车列的两端和中间共装3台转向架。三车厢车列的两端和中间共装4台两轴转向架。中间的转向架总是铰接相邻的两车厢。

车厢一般采用承载式，借助于弹簧支撑在转向架上。车厢主要由构架、侧板、车顶和车厢内部设备等组成。

电气控制系统主要包括牵引电动机、电阻器、集电装置、避雷器、照明设备及电气控制设备等。早期的电气控制系统采用鼓形控制器直接控制方式，20世纪70年代后期以来，逐渐改由晶闸管斩波器控制。架空接触线常用的电压有550，600，750V 3种。

制动设备包括制动闸瓦、制动传动装置、空气压缩机和空气管路等。一般均有电气制动和机械制动两套装置，相互配合使用。有的车还装有磁轨，用作紧急制动。

youxu yongdian

有序用电 (orderly use of electricity) 依法控制部分用电需求，维护供用电秩序平稳的管理活动。有序用电是一种需求侧管理措施，其目的是在电力供应不足或突发事件等情况下，利用行政、经济和技术等手段，避免无计划拉闸限电，规范用电秩序，将季节性、时段性电力供需矛盾给社会和企业带来的不利影响降至最低程度。2011年5月1日国家发展改革委颁发了《有序用电管理办法》，进一步加强和推动了有序用电工作的健康发展。

工作原则 有序用电工作需要遵循安全稳定、有保有限、注重预防的工作原则，最大限度地满足社会经济发展和人民生活对电力的需求。

（1）安全稳定。确保电网安全、电力用户人身和设备安全、社会经济运行安全，不影响正常的社会生产生活秩序。

（2）有保有限。优先保障的用电包括：①应急指挥和处置部门，主要党政军机关，广播、电视、电信、交通、监狱等关系国家安全和社会秩序的用户；②停电将导致重大人身伤害或设备严重损坏的企业的保安负荷（危险化学品生产、

矿井等)；③关系群众生命财产安全的用户（重大社会活动场所、医院、金融机构、学校等)；④城市运行基础设施用户（供水、供热、供能等)；⑤居民生活，排灌、化肥生产等农业生产用电；⑥国家重点工程、军工企业。重点限制的用电包括：①违规建成或在建项目；②产业结构调整目录中淘汰类、限制类企业；③单位产品能耗高于国家或地方强制性能耗限额标准的企业；④景观照明、亮化工程；⑤其他高耗能、高排放企业。

(3) 注重预防。加强电力供需平衡分析预测，提早制订有序用电方案，及时发布电力供需预警，提前做好有序用电各项准备。

工作内容 有序用电的主要工作内容有方案编制、预警管理、方案实施和奖惩措施。

(1) 方案编制。编制本地区年度有序用电方案。①根据年度电力供需平衡预测和国家有关政策，确定年度有序用电调控指标并分解下达。②按照先错峰、后避峰、再限电、最后拉闸的顺序安排电力电量平衡。不得在有序用电方案中滥用限电、拉闸措施，影响正常的社会生产生活秩序。③及时向社会和相关电力用户公布有序用电方案，加强宣传并组织演练。

(2) 预警管理。密切跟踪电力供需变化，定期向社会发布电力供需平衡预测、有序用电方案、相关政策措施等供用电信息，及时向社会发布预警信息。按照电力或电量缺口占当期最大用电需求比例的不同，预警信号分为4个等级：Ⅰ级，特别严重（红色、20%以上)；Ⅱ级，严重（橙色、10%～20%)；Ⅲ级，较重（黄色、5%～10%)；Ⅳ级，一般（蓝色、5%以下)。

(3) 方案实施。根据电力供需情况及时启动有序用电方案并实施。①依据有序用电方案，结合实际电力供应能力和用电负荷情况，合理做好日用电平衡工作。②优化有序用电措施，保证有序用电方案整体执行效果。在电力电量缺口缩小时及时有序地释放用电负荷，减少限电损失。③紧急状态下执行事故限电序位表、处置电网大面积停电事件应急预案和黑启动预案等。④以公告、电话、传真、短信等方式告知用户实施、变更、取消有序用电措施。

(4) 奖惩措施。利用电力需求侧管理等方面的资金，对除产业结构调整目录中淘汰类、限制类企业外实施有序用电的用户给予适当补贴，实行可中断负荷电价或高可靠性电价。对违反有序用电方案和相关政策的电网企业，予以责令改正或通报批评；对非计划停机或出力受阻的发电企业，可相应调减其年度发电量；对擅自超限额用电的电力用户，予以责令改正或按国家规定的程序停止供电。

管理措施 中国的有序用电措施包括错峰用电、避峰用电、限电和紧急拉闸。

(1) 错峰用电。将高峰时段的用电负荷转移到其他时段，通常不减少电能使用。具体措施有：①季节错峰用电采取的措施是动员和安排企业在夏季高温天气和冬季寒冷天气期间，进行全厂设备大修或主要用电设备检修。②日错峰用电采取的措施是合理调整企事业单位的周休息日，使每天用电负荷大小基本相同，也称之为轮休。③时段错峰用电采用的措施是调整上下班时间、调整生产班次、调整大设备的用电时间、将日常设备检修安排在用电高峰时段等。

(2) 避峰用电。在高峰时段削减、中断或停止用电负荷，通常会减少电能使用。具体措施有：①在用电高峰时段对可间断供电的生产设备或单位暂停用电；②事先安排大、中、小企业或用电大设备（高耗电产品）在用电高峰期间停产数小时或数日；③安排宾馆、饭店、娱乐场所、大型商场、写字楼等的集中空调设备在用电高峰时段间歇开停机；④晚上用电高峰时段停开霓虹灯、灯箱广告、灯饰等，在达到一定亮度的前提下停开部分路灯。

(3) 限电。在特定时段限制某些用户的部分或全部用电需求。具体措施有：①通知大用户自行控制减少用电负荷；②采用电力负荷管理系统下达终端用电负荷指标，实施当地控制、限制用电负荷；③采用电力负荷管理系统直接操作拉开终端接入的分路开关或总开关，限制用电负荷等。

(4) 紧急拉闸。各级调度机构发布调度命令，切除部分负荷。

youyuan peidianwang

有源配电网 (active power distribution network)

大量接入分布式电源、功率双向流动的配电网，又称主动配电网。有源配电网是一个能量交换与分配的网络，其潮流与故障电流双向流动，传统配电网的潮流与故障分析、电压无功控制、继电保护方法以及运行管理措施已不再适应，均需要做出相应的调整与改进。称其为主动配电网，意在强调分布式电源主动地调节其无功与有功输出并应用现代通信手段对配电网进行协调控制，以充分发挥分布式电源的作用，实现配电网的优化运行。

有源配电网的关键技术包括有源配电网规划、潮流与故障分析计算、继电保护、电压无功控制技术、分布式电源运行调度技术等。

有源配电网规划 从一次网架设计、设备选型、保护控制方案等方面充分考虑分布式电源接入的需要，最大限度地接纳分布式电源并发挥其作用。此外，分布式电源容量客观上可以替代一部分系统容量，因此，研究分布式电源容量的置信度，即对系统容量的替代作用，也是有源配电网规划的一个重要研究内容。

潮流与故障分析计算 研究分布式电源的潮流分析与故障分析等效电路及其数字仿真模型、有源配电网潮流与故障计算方法。开发有源配电网数字仿真软件，提供实时仿真分析与辅助决策工具，更有效地支持各种高级应用软件，如潮流计算、网络重构、电压无功优化等。潮流与故障分析计算是有源配电网的一项基础技术。

继电保护 包括配电网保护与分布式电源并网保护两部分内容。①配电网保护研究分布式电源对继电保护的影响及其解决方案。②分布式电源并网保护内容包括系统侧故障保护、分布式电源侧故障保护与反孤岛保护。

电压无功控制 利用现代通信与测控技术，通过获取母线、分布式电源并网点以及线路分段开关处的电压测量信息，优化决策，合理调整变电站母线电压、线路调压器的输出电压、无功补偿功率以及分布式电源的有功和无功功率输出，保证配电网电压合格并降低线路损耗。

分布式电源运行调度技术　系统采集、处理分布式电源的实时运行数据，并对其进行调节与控制。常规的配电网运行管理，把分布式电源作为一个负荷对待，不对其进行调度。随着分布式电源的大量接入，其对配电网运行与功率平衡的影响不能忽略，因此，应将其纳入电网的调度管理，采用虚拟发电厂技术，既充分发挥分布式电源的作用，又能保证配电网的安全稳定运行。

虚拟发电厂（virtual power plant，VPP），是将配电网中分散安装的分布式电源通过技术支撑平台实现统一调度并将其等效为一个发电厂。虚拟发电厂的作用是实现分布式电源的大量并网、优化利用，降低电网峰值负荷，减少损耗，提高供电可靠性。实施虚拟发电厂技术是以配电网自动化系统作为技术支撑平台的，它也是配电网自动化系统的一个高级应用功能。

youdaoxing

诱导性　（guidance）　沿着道路恰当地安装灯杆、灯具，可以给驾驶员提供有关道路前方走向、线型、坡度等的视觉信息。道路照明的诱导性对于交通安全和舒适性有着非常重要的作用，在道路照明的设计中应该保证诱导性方面的要求。诱导性不能用光度参数来表示。诱导性分为视觉诱导和光学诱导，两者既有区别又有紧密的联系。视觉诱导是通过道路的诱导辅助设施使驾驶员明确自身所在位置以及道路前方的走向。这些诱导辅助设施包括路面中线、路缘、路面标志、应急路栏等。光学诱导是通过灯具和灯杆的排列、灯具的外形外观、灯光颜色等的变化来标示道路走向的改变或是将要接近道路的交叉口等特殊地点。

为保证道路照明具有良好的诱导性，在设计时应有针对性地加以考虑。对道路设施的诱导而言，应提高路面标志设施的可见度，如通过扩大其反光性能以及路面反光性能的差异的方法是有效的；同时也可采取限制纵向（平行于路轴的方向）的入射光、大部分光射向道路的横向（与车辆行进方向垂直）的灯具或照明系统，以利于看清道路中线或道路边缘等诱导辅助设施。

CJJ45—2006《城市道路照明设计标准》规定了诱导性作为道路照明质量的评价指标。

yure fadian

余热发电　（waste heat power generation）　回收生产工艺过程中未被利用的热量或新产生的二次能源来发电的技术。余热发电是提高能源利用率，降低产品能耗，实现节能的有效途径。工矿企业在生产过程中，一方面需消耗大量的一次能源或二次能源，同时又放散了相当大的一部分能量，如高温产品、烟气、炉渣、冷却水等带走了大量的热量或可燃气体，不仅浪费了能源，而且污染了环境。随着社会进步和科学技术的发展，从20世纪40年代开始，一些国家着手研究对生产工艺过程中放散能量的回收利用技术。70年代石油危机后，能源的节约和环境保护问题引起世界各国的重视，使得对生产工艺过程中存在的余能以及可燃性气体的回收利用技术有了很大的发展，其中利用余热发电是一项重要成果。进入21世纪，随着生产工艺以及设备能效的提高，低温余热发电技术发展较快，进一步提高了余热发电的效率。

余热发电资源　工矿企业在生产工艺过程中未被利用的能量，通常以热能、位能、动能以及可燃性气体的形式放散，由烟气、高温产品、炉渣、冷却水或阻尼装置等带走或消耗。黑色金属、有色金属行业的高温冶炼产品、炉渣、烟气带走的大量高温热量；化工行业的炭黑厂、硫酸厂、甲醛厂的尾气和冷却水带走的大量焙烧和化学反应热量；造纸厂、制糖厂、纺织厂锅炉生产的蒸汽经减压后使用引起的能量损失；冶金行业高炉、转炉、焦炉放散的煤气，煤矿抽放的瓦斯，炼油厂放散的炼制气等都是可燃性气体。这些可燃气、蒸汽压差、高炉烟气、炭黑厂和硫酸厂的尾气都可用于发电。各行业的余热总资源约占其燃料消耗总量的17%～67%，可回收利用的余热资源约为余热总资源的60%。

余热发电方式　包括余能压差发电、回收余热发电和可燃气发电。

余能压差发电　利用流体压力膨胀做功带动发电机发电。造纸、制糖、纺织印染、铝氧、合成氨等生产过程需要低压蒸汽来供热或用作原料，为了提高能源的利用率，一般采用中压锅炉生产蒸汽，再减压变成低压蒸汽供工艺使用。为回收减压造成的能量损失，可以采用抽汽或背压汽轮机组发电来回收减压造成的能量损失。石化行业的炼油厂和冶金行业的高炉也产生大量的有一定压力的烟气，为回收这部分压差能量，可烟气膨胀透平机组发电，也可直接用于拖动生产机械。

回收余热发电　工矿企业中的工业窑炉，如硫酸厂的硫铁砂焙烧炉、炭黑厂的制炭炉、轧钢厂的加热炉等，在使用时要排放大量的高温烟气，放散大量热能。要回收这部分热量，可加装余热锅炉，再将余热锅炉产生的蒸汽供汽轮机发电或用作其他的热源。

可燃气发电　煤矿抽放的瓦斯，冶金行业高炉、铁合金炉、焦炉排出的煤气，炼油厂排放的炼制气，电石炉排放的烟气，都含有可燃性气体。将其回收集中，供燃气轮机组发电，既可节约能源，增加发电量，又可减少对环境的污染，是综合性节能措施。

yule qiju

娱乐器具　（entertainment appliances）　通过将电能转化为其他形式能以实现各种声音、影像、动作，使人们可以用来放松娱乐、丰富文化生活的一类器具（见家用电器）。主要包括电动玩具、电乐器、自动麻将机等。

电动玩具　通过电动机把电能转变为机械能，从而做出各种动作。电动玩具涉及力学、声学、光学、电子学等多种学科。电动玩具多以电池为动力源，依靠电动机产生动力，通过模仿人、动物、交通工具等逼真的运动特征，吸引人的注意力。在此基础上，高档次的电动玩具通过更为复杂的交互技术实现人和电动玩具的互动，以增大玩具的愉悦性和各年龄层次人们对电动玩具的喜爱程度。例如，遥控电动玩具汽车（见图1），可以根据人的指令做出起动、定制、加速、减速、转向等一系列动作，在丰富人们娱乐生活的同时，甚至已经形成一项具有竞技性的比赛项目。

电乐器　通过将电能转化为声能供人们演奏乐曲的各种

器具。按照发声原理的不同可以分为电声乐器和电子乐器，见图 2。①电声乐器。应用传统乐器的发声机理做声源，经过声-电转换后，由电子电路进行扩声和做各种音色处理，再由扬声器放声。电声乐器省去了传统乐器体积庞大的共鸣腔，并能产生许多特殊的音乐效果，而且音量可调整，动态范围大。②电子乐器。利用电子技术直接发声来模拟传统乐器。电子乐器不仅可以利用电子技术对各种传统乐器乐音的音高、音色、响度、瞬态特征进行模拟，还能表现传统乐器无法发出的乐音，甚至是自然界从未有过的声音。



图 1　遥控电动玩具汽车



图 2　电子琴

自动麻将机　通过电动机将电能转化为机械能使麻将牌可以自动完成洗牌、砌牌的娱乐器具。自动麻将机主机一般包括电源、电动机、探测装置、传动装置以及磁性麻将牌等部件。自动麻将机按推牌方式分为单口机、四口机、八口机。①单口机。只有一个推牌口的麻将机，通过输送链条将牌送到各方，上牌速度慢，大约要 2min 完成上牌动作，且故障率高。②四口机。有四个推牌口，可以四个口同时上牌，上牌速度快，一般 18～35s 可以完成上牌动作。③八口机。在四口机的基础上增加了自动抓牌的功能。

yuzhi dianlan jietou

预制电缆接头

（premolded cable joint）　以乙丙橡胶、硅橡胶或三元乙丙橡胶制作的整体预制件为主要绝缘部件的电缆附件。乙丙橡胶和三元乙丙橡胶的橡胶预制件采用挤塑或模压成形后硫化而成，硅橡胶预制件采用铸造成形后硫化而成。预制电缆接头包括预制电缆终端和中间接头，一般由橡胶预制件、绝缘管及导体连接管等部件组成。（见热缩电缆接头）

预制电缆接头虽有安装简单、省时等优点，但缺点是预制件的内径必须与电缆绝缘的外径相仿，而且电缆芯必须是正圆形。若预制件内径过大，则套入电缆芯后接触界面上压力不够，使界面电气性能降低；若预制件内径过小，则不易套入电缆芯，并导致过高的初始界面压力，使预制件因变形过大而加速界面压力松弛，同样降低了电气性能。因此，选用预制电缆接头时，必须了解电缆的精确尺寸。

yuzhi zengliang

阈值增量

（threshold increment）　存在眩光源时，为了达到同样看清物体的目的，在物体及其背景之间的亮度对比上需要增加的百分比，用符号 TI 表示。它是度量失能眩光的量。阈值增量的大小除了取决于光幕亮度外，也与眼睛的适应亮度有关。1974 年，国际照明委员会（CIE）在第 31 号出版物《道路照明装置的眩光和均匀性》中首次提出阈值增量计算的原理和方法。

根据 CIE 提出的有关研究失能眩光的阈值对比曲线的变化，没有眩光时一个刚刚可以看见的物体，在有眩光时就看不见了，除非增加实际对比。人们将这个效应作为度量由于眩光导致视功能损失的基础，并称之为阈值增量。阈值增量越大，说明视功能损失也越大，即失能眩光越严重。阈值增量用来限制失能眩光对观察物体的影响，CIE、北美照明学会（IESNA）和包括中国在内的不少国家都采用阈值增量来限制道路照明的失能眩光或限制城市的非道路照明设施，如景观照明灯光或广告标志灯光等对车辆驾驶员产生的失能眩光。中国采用了 CIE 的方法，规定了道路照明以阈值增量作为眩光评价指标。

失能眩光的定义是“降低视觉对象的可见度，但不一定产生不舒适感觉的眩光”，包含两层含义：①失能眩光损害眼睛视看物体的能力，直接影响到驾驶员觉察障碍物的能力，即降低视觉对象的可见度，影响行车安全。②并不是只有产生了不舒适的感觉，它才是失能眩光，才有危害，也就是说，一条道路不是看上去让人感到耀眼夺目才说明眩光超标，很可能人的视觉还没有不适的感觉，失能眩光就已经产生了严重的危害，对视觉功能产生了影响。

对于 0.05～5cd/m^2 之间的平均路面亮度，阈值增量用下式计算，即

$$TI=65\times\frac{L_v}{L^{0.8}}\ (\%)$$

式中 TI 为阈值增量，%；L_v 为等效光幕亮度，cd/m^2，假定观测者总是以与水平线成 1°夹角注视与路中轴平行的正前方（即一直注视着前方 90m 路面上的一点）的亮度；L 为平均路面亮度，cd/m^2。

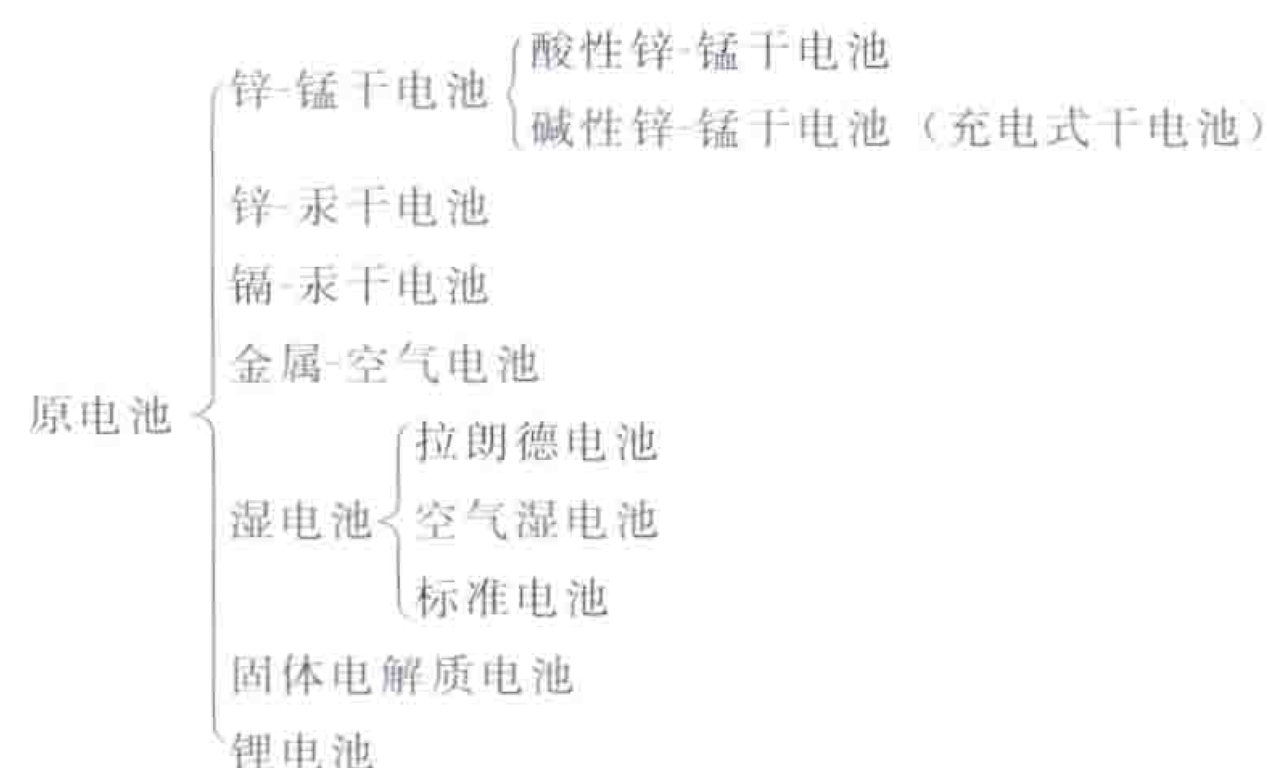
yuandianchi

原电池

（primary cell）　放电后不宜用充电方法使其再次获得放电能力，即反应是不可逆的化学电源。原电池是经常处于可工作状态，充分放电后只得丢弃的电池，又称为非贮备式电池、一次电池。

原电池的电化学式可写成：㊀负极活性物质 | 电解质 | 正极活性物质㊉，式中“|”代表界面。当接通外电路时，负极活性物质发生氧化反应，释放出电子，经外电路输至正极，正极活性物质接受电子发生还原反应。这两种反应都发生在电极活性物质和电解质接触的界面上。电解质的离子导电作用使电池内两极间能传输电子。原电池一般均由具有活性物质的正、负电极，电解质，隔膜，容器等部分构成。

原电池用途广泛，品种繁多，可分类如下：



锌-锰干电池 又称勒克朗谢电池、碳-锌干电池，俗称干电池。按电解质的不同，可分为酸性盐溶液锌-锰干电池（又称酸性锌-锰干电池）和碱性盐溶液锌-锰干电池（又称碱性锌-锰干电池或充电式干电池）两种。两种电池的外形、尺寸、电压等基本上是一样的，但在性能上后者要优越得多，价格上也贵得多。

锌-锰干电池系1868年法国化学家G. 勒克朗谢（Georages Leclanché，1839—1882）所发明，当时为湿电池，1886年始由美国人C. 加斯纳（C. Gassner）将其改进为干电池。经不断改进，已成为用途最广、使用方便、价格便宜的干电池。锌-锰干电池正不断向高容量、大电流连续放电的方向发展。再充电式碱性锌-锰干电池则向提高充放电循环次数的方向发展。

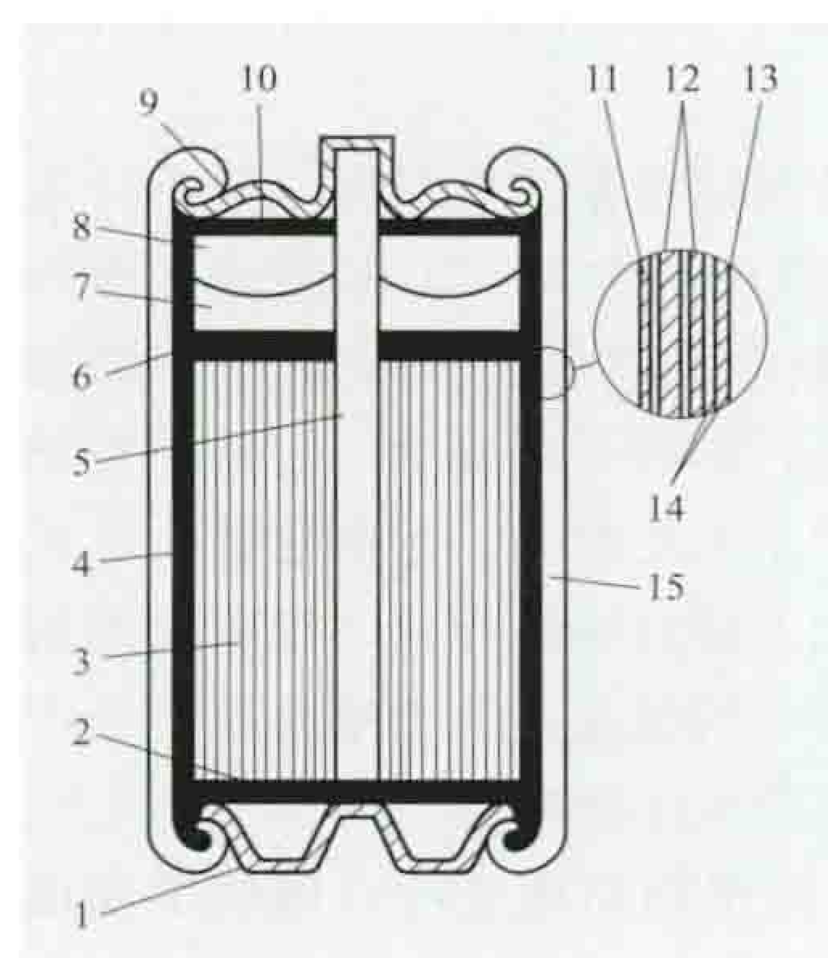
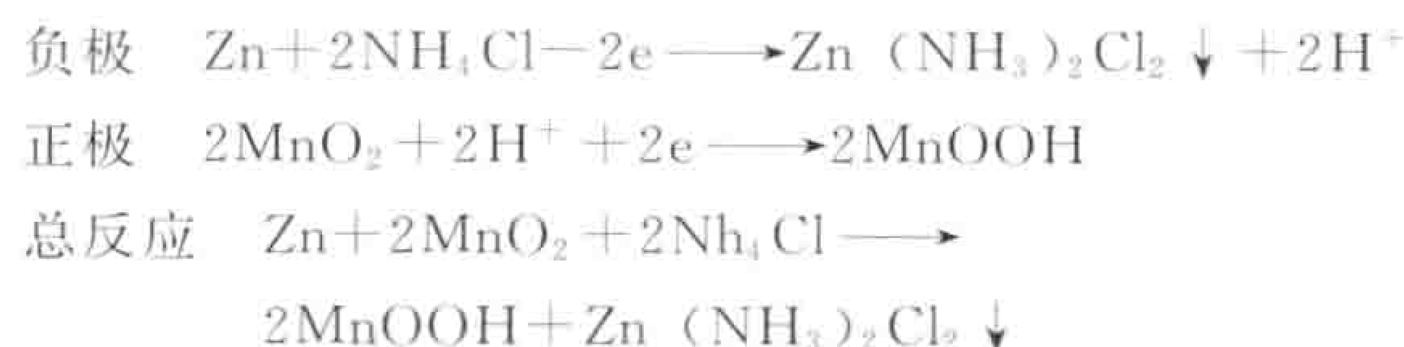


图1　酸性锌-锰干电池结构示意图

1—马口铁假底；2—杯型底衬垫；3—正极活性物质（二氧化锰等的混合物）；4—浆层纸隔离层；5—碳棒；6—密封垫；7—沥青密封层；8—膨胀气室；9—电镀顶盖；10—绝缘垫片；11—吸水牛皮纸衬里；12—聚乙烯；13—商标；14—牛皮纸；15—负极（挤压锌筒）

原理及结构　结构不同的锌-锰干电池，其原理也不相同。

（1）酸性锌-锰干电池。负极活性物质为锌，在圆筒形干电池中，锌负极兼作外壳；正极活性物质为二氧化锰和炭黑的混合物；电解液为氯化铵和氯化锌的水溶液。隔膜是吸附有电解液的纸、糨糊或凝胶。酸性锌-锰干电池结构示意见图1。电池放电时，负极发生氧化反应，正极发生还原反应，其过程相当复杂，基本反应式可表示为



负极　$Zn+2NH_4Cl-2e \longrightarrow Zn(NH_3)_2Cl_2\downarrow+2H^+$

正极　$2MnO_2+2H^++2e \longrightarrow 2MnOOH$

总反应　$Zn+2MnO_2+2NH_4Cl \longrightarrow 2MnOOH+Zn(NH_3)_2Cl_2\downarrow$

（2）碱性锌-锰干电池。负极活性物质为锌粉，正极活性物质为纯度较高的二氧化锰和石墨的混合物，电解液为氢氧化钾浓溶液。电池两极的电化学反应仍然是氧化、还原反应，过程复杂。其最大特点是有一定的充放电可逆反应性能，能充放电数十周期。基本反应式可表示为



负极　$Zn+2OH^--2e \longrightarrow ZnO+H_2O$



正极　$2MnO_2+2H_2O+2e \longrightarrow 2MnOOH+2OH^-$



总反应　$Zn+2MnO_2+H_2O \longrightarrow 2MnOOH+ZnO$

技术性能　酸性锌-锰干电池的开路电压为1.7～1.8V，工作电压为1.5V，放电率低，比能量小，工作温度范围为15～35℃，由于自放电，贮存期为9～18个月。碱性锌-锰干电池的开路电压为1.52V，工作电压为1.25V，工作温度范围为－20～60℃，电池的内阻较小、放电电压较高、放电特性曲线较平稳、输出功率较酸性锌-锰干电池约大10倍，适用于高负荷放电。

类型、特点及用途　锌-锰干电池除按电解液分类外，又有单体和组合电池之分。锌-锰干电池的类型、特点和用途见表1。

表1　锌-锰干电池的类型、特点和用途

类型	特　点	用　途
圆筒形锌-锰干电池	仅适用于小电流工作，电压精度低，低温性能差，贮存期9～18个月，用途广泛，产量最大，价格便宜	手电筒、晶体管收音机、录音机、小型电台、仪器仪表、小型电动器具、电动玩具等的电源
碱性圆筒形锌-锰干电池（充电式干电池）	适用于大电流连续放电，温度适应性较好，能耐－60℃低温，容量高，放电电压平稳，有一定的再充电性能	闪光灯，照相机，晶体管收、录音机，仪器仪表，电动玩具，小型电动器具，便携式电视机等的电源
叠层锌-锰干电池	由片形锌-锰干电池叠合串联组装成的组合电池。电压高，适用于小电流连续放电，价格便宜	仪器仪表、物探、无线电通信、袖珍电子计算机、信号灯等的电源
组合方形锌-锰干电池	由圆柱形或方形单体锌-锰干电池串联组装成的组合方形电池。电压高，适用于小电流连续放电，价格便宜	通信设备、电子仪表、设备点火、电话机等的电源

锌-汞干电池 又称汞电池。由美国人S.鲁宾（S. Ruben）为满足电子仪器的需要于1941年研制成功。锌-汞干电池适用于对电压精度有较高要求的仪器，如助听器、照相曝光表、手表、医疗仪器等的电源。

锌-汞干电池的负极活性物质为锌，正极活性物质为氧化汞和石墨的混合物，电解液为含有氧化锌的氢氧化钾饱和水溶液，隔膜为饱含电解液的纤维素材料，如羊皮纸或凝胶层。电池负、正两极的电化学反应为



负极　$Zn+2OH^- \longrightarrow ZnO+H_2O+2e$



正极　$HgO+H_2O+2e \longrightarrow Hg+2OH^-$



总反应　$Zn+HgO \longrightarrow Hg+ZnO$

电池外壳一般作为双层结构，间隙中填充着吸液材料，即使电池中产生的气体被迫排出时，也可使带出的电解液或湿气量减到最少。通常制成容量小的扣式或圆柱式电池。扣式锌-汞干电池结构示意如图2所示。

锌-汞干电池的开路电压为1.35V；工作电压为1.3V，放电电压平稳，比能量高，放电容量与放电方式（连续或断续）几乎无关；耐高温，可在70℃时使用；搁置性能优良，贮存寿命可达3～5年。缺点是低温性能差，不能在0℃以

下使用，价格昂贵。

镉-汞干电池 一种碱性原电池，主要用作心脏起搏器、无线电通信、水雷等的电源。

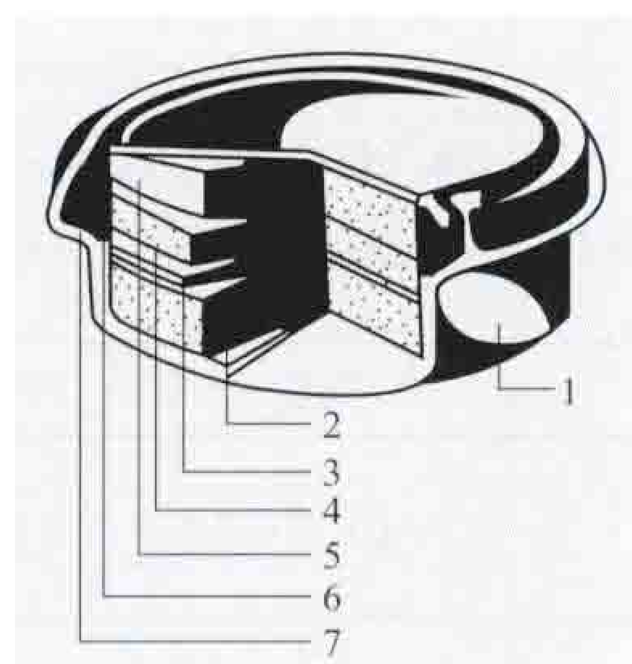


图2 扣式锌-汞干电池结构示意图

1—容器；2—正极；3—隔膜；4—电解液保持层；5—锌负极；6—封口盖；7—绝缘垫

镉-汞干电池和锌-汞干电池的主要区别在于它的负极活性物质为镉。镉-汞干电池的开路电压为0.93V，工作电压平稳；使用温度范围宽，为-49～149℃；自放电很小，贮存寿命可达20年；电池内部不产生气体，故可制成全密封的电池。20世纪70年代已有可充电式的镉-汞干电池，循环寿命约350周期。这种电池的缺点是工作电压较低，成本很高，因而限制了它的使用和发展。

金属-空气电池 既属燃料电池又属蓄电池的一种原电池，按性能可分为一次电池、二次电池和机械再充电式电池。其负极活性物质可以是固态的，也可以是浆状的，正极活性物质为空气中的氧，电解液或是循环流动的，或是静止不动的。金属-空气电池主要有锌-空气、锂-空气、铝-空气、镁-空气、铁-空气电池等几种。较为成熟的仅有一次锌-空气电池、铝-空气电池和机械再生式可充电锌-空气电池，主要用于电子产品、助听器、航标灯等的电源，也有利用机械再生式可充电锌-空气电池及铝-空气电池为电动汽车提供动力电源的应用。锌-空气电池是法国人Ch. 费里（Ch. Fêry）于1917年研制成功的。

金属-空气电池的负极活性物质为锌、锂、铝、镁、铁等活性金属，正极为燃料电池的气体扩散电极，其活性物质为大气中的氧，电解液可用KOH、NaOH、NaCl及海水。以锌-空气电池为例，其总反应为



$$\frac{1}{2}O_2+Zn+2KOH \longrightarrow K_2ZnO_2+H_2O$$

锌-空气电池的额定电压为1.4V，工作电压为1.2～1.3V，理论质量比能量达1350W·h/kg，实际已达230～300W·h/kg，工作温度为-20～40℃，使用寿命较短。金属-空气电池的比能量高，可以大电流密度放电，这是一般干电池无法相比的；其电极活性物质价格低廉，因而成本较低。这种电池还存在一些问题，如金属电极易腐蚀，自放电大，大气易使电解液炭化而使电池失效，高速率放电时散热困难，二次电池的充电方法以及寿命短等问题也有待改善。

湿电池 因电池中含有大量自由流动的电解液而得名。湿电池主要有拉朗德电池、空气湿电池、标准电池等。

拉朗德电池 碱性锌-氧化铜一次电池，因含有大量的游离电解液，故又称湿电池，多用作铁路信号灯、照明等装置的电源。

电池的负极为汞齐化的高纯度锌，正极为氧化铜粉和苛性钠或硅酸钠黏结剂相混并经模压、烧结（650～950℃）制成，电解液通常用浓氢氧化钠溶液，其结构示意见图3。电池开路电压在1.1V左右，工作电压较低，为0.6～0.7V，电压平稳，放电性能稳定，放电容量高。

空气湿电池 又称空气电池，主要用作铁路信号装置、公路闪光系统等的电源。空气湿电池是H.D. 奈伯格（H.D. Nyberg）于1924年研制成功的价格低廉的电池。

空气湿电池负极的活性物质为锌，正极为部分防水的微孔碳，其一面曝露在大气中，利用空气中的氧作为正极活性物质，另一面置于容器内。电解液为氢氧化钠（氢氧化钾）水溶液，其结构示意如图4所示。

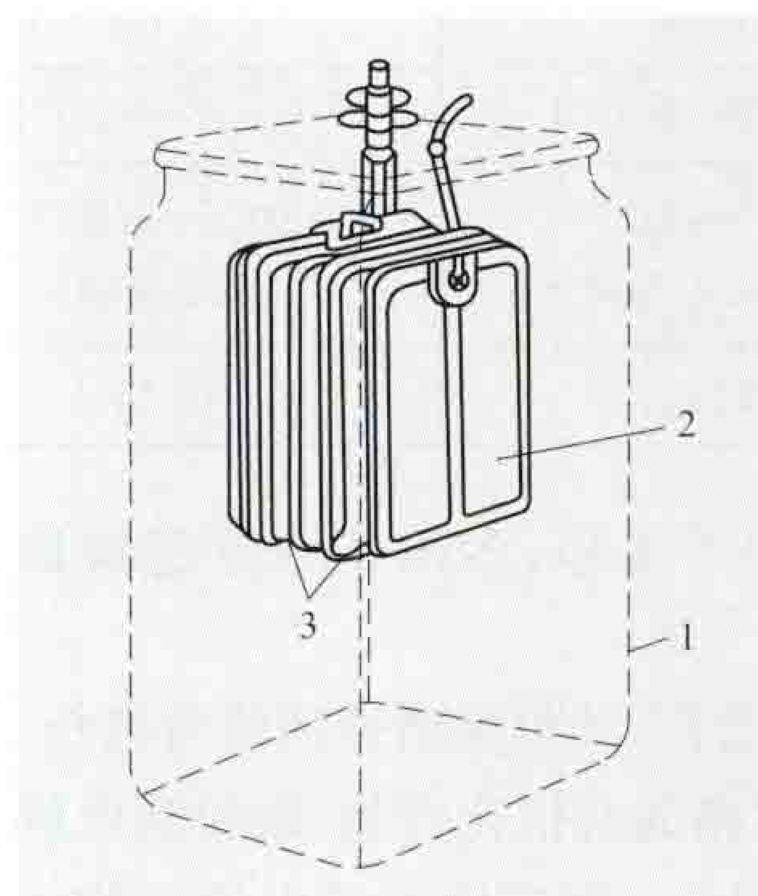


图3 拉朗德电池结构示意图

1—玻璃容器；2—锌负极；3—氧化铜正极

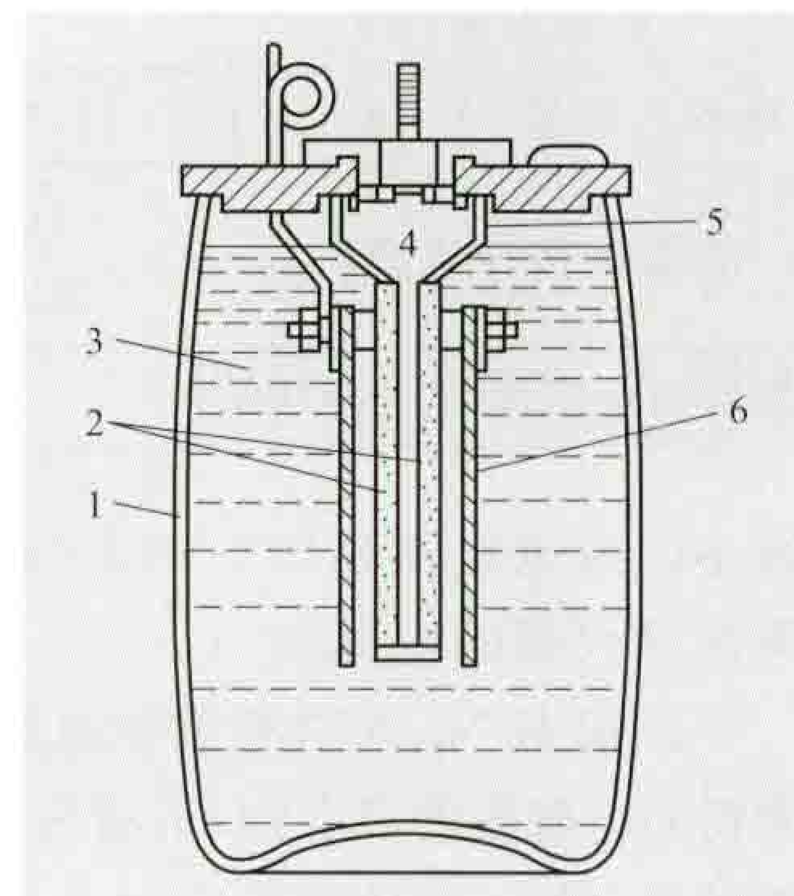


图4 空气湿电池结构示意图

1—玻璃槽；2—附在带孔金属片上的碳板正极；3—电解液；4—空气室；5—塑料框；6—锌负极

电池开路电压为1.46V，平均工作电压为1.13V，终止电压为1.05V。电池的放电电流不能过大，如容量为500A·h的电池，在室温下最适宜的放电电流为2A。

标准电池 又称韦斯顿电池，是电动势准确而又稳定的一种原电池。在工业上或实验室中常以其电动势作为标定电压的标准量，与电压差计配套使用。该电池是1872年L. 克拉克（L. Clark）发明的，1893年由英国化学家韦斯顿（Weston）改进成为现在的标准电池。

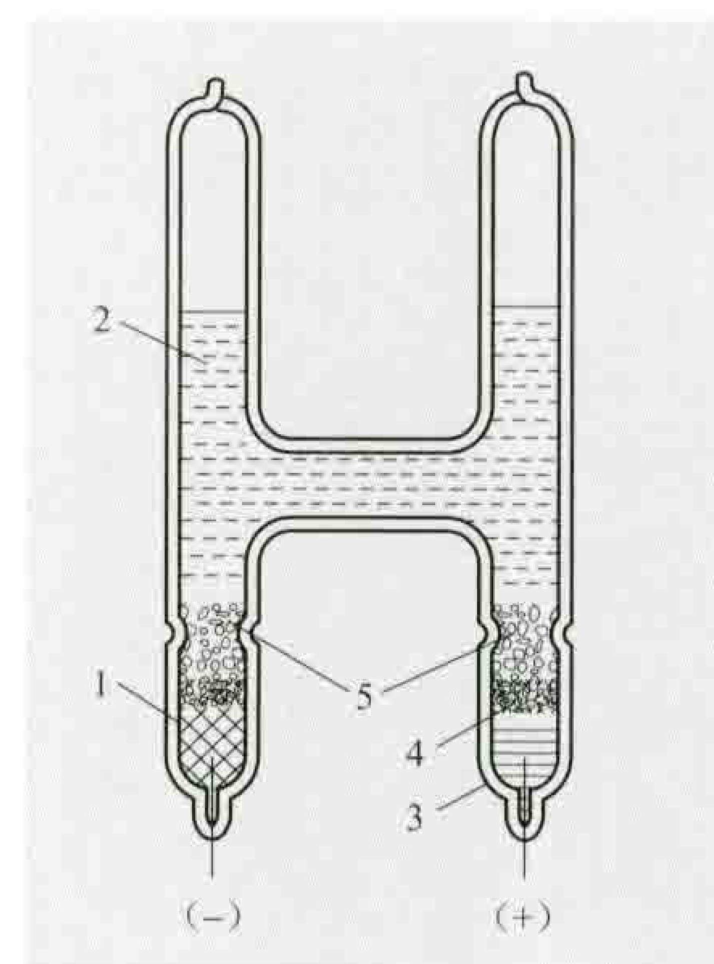


图5 饱和式标准电池结构示意图

1—10%镉汞齐负极；2—硫酸镉的饱和溶液；3—汞正极；4—硫酸亚汞和汞的混合物；5—硫酸镉结晶

标准电池的负极为镉汞齐，正极为上面覆盖着硫酸亚汞的纯汞，电解液为硫酸镉溶液，其结构示意见图5。在任何温度下，硫酸镉电解液都呈饱和状态的称为饱和式标准电池。1908年，在英国伦敦召开的电气单位国际会议上标准电池被推荐为电动势的标准器，在20℃时其电动势为1.018 30V（国际），在0～40℃范围内随温度变化的关系式为

$$E_t=1.018\,30-40.6\times10^{-6}(t-20)-0.95\times10^{-6}(t-20)^2+0.01\times10^{-6}(t-20)^3$$

饱和式标准电池电动势的再现性只有2～3μV的误差。在实验室条件下，电池的使用寿命可达5～10年。

固体电解质电池 以固态离子导体传导电子的原电池，其电解质或是固体离子导体，或是离子交换膜。固体电解质电池是1971年由J.E. 奥克斯利（J.E. Oxley）发明的。固态电解质电导率低于液态电解质溶液，因此，这类电池只能在

表 2　固体电解质电池体系、性能表

电池名称	银-R_4NI_3 固体电解质电池	银-花碘 固体电解质电池	锂-碘化铅 固体电解质电池	锂-碘 固体电解质电池	钠-溴 固体电解质电池
体　系	$Ag\mid Ag_4RbI_5\mid R_4NI_3$	$Ag\mid 4AgI\mid KCN\mid$ 花碘	$Li\mid LiI, Al_2O_3, LiOH\mid PbI_2, PbS$	$Li\mid LiI\mid I_2$	$Na, Hg\mid \beta Al_2O_3\mid Br_2$
开路电压(V)	0.66	0.64	1.9	2.8	3.77
体积比能量($W\cdot h/cm^3$)	0.037～0.073	0.037～0.073	0.208～0.488	0.650	0.238～0.330
典型的放电电流(A)	10^{-3}～10^{-6} (100mA 脉冲)	10^{-3}～10^{-5} (1A 脉冲)	10^{-4}～10^{-5}	10^{-4}～10^{-5}	10^{-3}～10^{-5}
室温时电极电导率(S/cm)	0.21	0.14	10^{-5}	10^{-7}	10^{-2}～10^{-3}

很小的放电电流(10^{-3}～10^{-6} A)下工作，多用作心脏起搏器等医疗仪器的电源。

以银-R_4NI_3 固体电解质电池为例，其负极活性物质为银粉、碳粉和电解质的混合物，正极为含碘的有机化合物、碳粉和电解质的混合物。固体电解质为 Ag_4RbI_5。固定电解质电池结构示意见图 6。固体电解质电池分为 5 种，其主要性能见表 2。此外，这类电池具有使用温度范围宽(—55～70℃)、耐强烈的自旋振动和冲击、无排气漏液问题、维护简便、易微型化等特点。

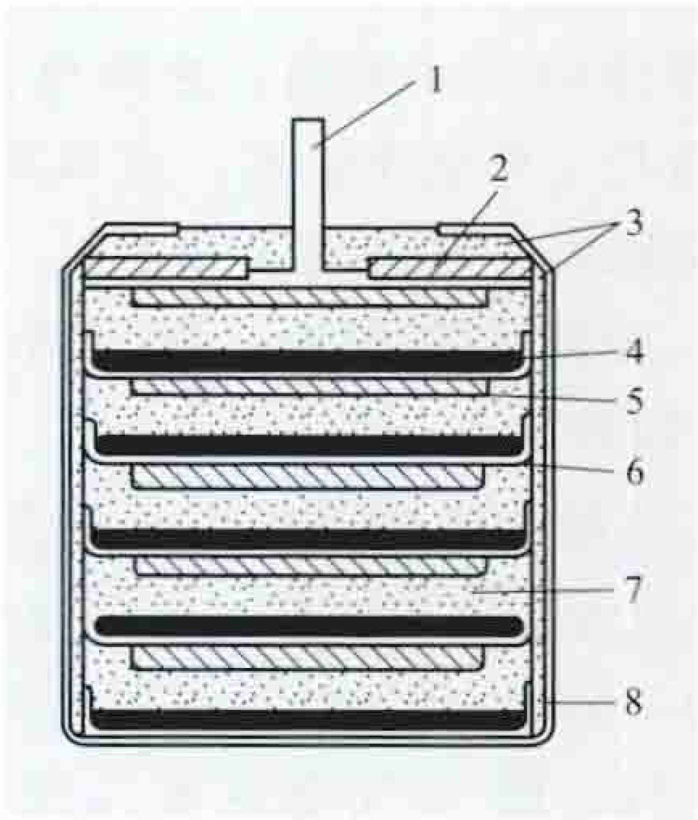


图 6　固体电解质电池结构示意图
1—负极接线端；2—绝缘垫；3—灌封胶；4—正极；5—负极；6—电池连接片；7—电解质；8—外壳(正极)

锂电池　以金属锂为负极活性物质的高能电池。(见锂电池)



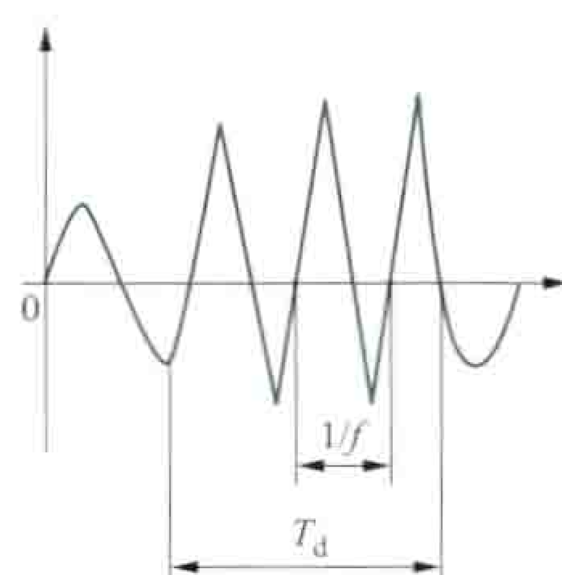
zanshi guodianya

暂时过电压 (temporary overvoltage) 在给定安装点上持续时间较长的不衰减或弱衰减的（以工频或其一定的倍数、分数）振荡的过电压。暂时过电压与电力系统结构、容量、参数、运行方式、故障条件以及各种安全自动装置的特性有关。暂时过电压典型波形如图所示。

分类 暂时过电压包括工频过电压和谐振过电压。

（1）工频过电压的产生机理可归属为电感-电容效应和三相阻抗不对称。一般由空载线路的电容效应、接地故障和甩负荷等引起。

（2）谐振过电压有线性谐振、非线性（铁磁）谐振和参数谐振过电压。一般因操作或故障引起系统元件参数出现不利组合而产生。①线性谐振是电感-电容效应的极端情况；②非线性谐振发生于铁磁元件（电压互感器和变压器等）电路中，往往由于其电磁电感的饱和作用，而激发起持续的较高幅值的铁磁谐振过电压；③参数谐振发生在时变电感电路中，因电路参数配合不当造成。



暂时过电压典型波形
$10\text{Hz}<f<500\text{Hz}$
$0.03\text{s}<T_d<3600\text{s}$

标准 GB/T 18481—2001《电能质量 暂时过电压和瞬态过电压》，规定了电力系统中作用于电气设备的暂时过电压要求、电气设备的绝缘水平，以及过电压保护方法。电力系统工频过电压限值（包括空载线路合闸、单相重合闸、成功的三相重合闸、非对称故障分闸及振荡解列等操作）见表。

电力系统工频过电压限值

电压等级（kV）	过电压限值（标幺值）
U_m>252（Ⅰ）	1.3
U_m>252（Ⅱ）	1.4
110 及 220	1.3
35～66	$\sqrt{3}$
3～10	$1.1\sqrt{3}$

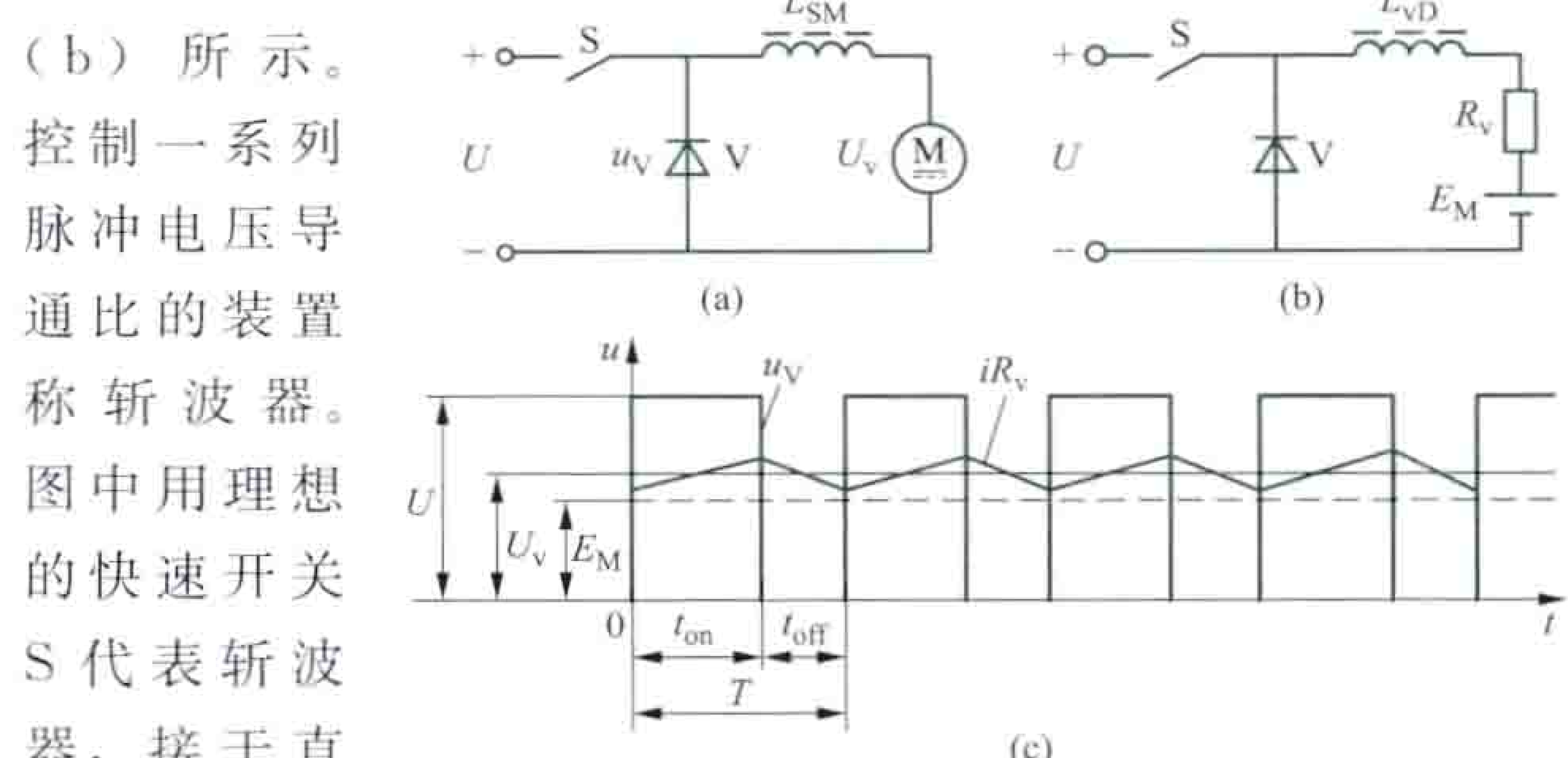
注：1. U_m 指工频峰值电压。
2. Ⅰ和Ⅱ分别指线路断路器两侧。

防护措施 暂时过电压的主要防护措施包括：①对于长线路的电容效应，可以安装并联电抗器来限制工频过电压；②采用保护装置限制暂时过电压幅值和持续时间，避免产生谐振过电压条件。

zhanbo kongzhi zhiliu tiaosu

斩波控制直流调速 (speed control of chopper-controlled DC motor) 通过控制斩波器中开关器件的导通比，产生一系列可调的脉冲电压为直流电动机电枢回路供电，以实现直流电动机调速的技术，又称脉冲控制直流调速。

原理 斩波控制直流调速的原理电路见图（a），其等效电路如图（b）所示。控制一系列脉冲电压导通比的装置称斩波器。图中用理想的快速开关S代表斩波器，接于直流电源 U 与直流电动机M之间，在S断开时二极管V为电动机的电枢电流提供续流通道。若S快速通断，且通断周期 T（称斩波周期）很短，大大小于电动机M的机电时间常数，这样得到的电动机端电压将为一系列脉冲电压，如图（c）所示。



斩波控制直流调速原理图
（a）原理电路图；（b）等效电路图；
（c）负载电压波形图
L_{vD}—电枢回路的总电感；R_v—电枢回路的总电阻；E_M—电动机的反电动势；U—输入电压；U_v—电枢端电压平均值；L_{SM}—平波电抗器电感

设理想快速开关闭合时间为 t_{on}，关断时间为 t_{off}，输出的系列脉冲电压的平均值（$U_v=U\alpha$，U 为输入电压）以及闭合时间 t_{on} 与通断周期 T（$T=t_{on}+t_{off}$）的比（即导通比 α，$\alpha=\frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}}$）有关。改变导通比就可改变电动机端电压的平均值，从而达到调速的目的。

控制导通比 α 有脉冲宽度调制、脉冲频率调制、脉冲时间调制三种方式。

（1）脉冲宽度调制（pulse width modulation，PWM）：保持斩波通断周期 T 不变，即斩波频率 $f\left(f=\frac{1}{T}\right)$ 不变，只改变斩波器的导通时间 t_{on} 的脉冲宽度调制。

（2）脉冲频率调制（pulse frequency modulation，PFM）：保持导通时间 t_{on} 不变（或关断时间 t_{off} 不变），改变斩波通断周期 T，即改变斩波频率 f 的脉冲频率调制。

（3）脉冲时间调制（pulse time modulation，PTM）：导通时间 t_{on} 与斩波周期 T（或频率 f）协同调节的脉冲时间调制。

PWM方式对解决斩波频率与机械固有频率、滤波频率等的谐振问题比较容易，而且抗干扰能力较强，并且具有能使电动机在四象限运行和实现再生制动、节约能源、改善电源环境、调速平滑、调速范围宽、响应快等优点，因而广泛应用于城市无轨电车、地下铁道、电动车组、工矿电机车、蓄电池车、潜艇、数控机床等方面。

简史与发展 自20世纪六七十年代斩波控制直流调速问世以来，该项调速技术使用的主要设备是以晶闸管构成的斩波器。但强迫关断晶闸管的换流电路很复杂，技术难度

大，限制了这项技术的使用。70年代后期至80年代，随着自关断功率半导体器件（即可关断晶闸管GTO、大功率晶体管BJT、场效应晶体管MOSFET、绝缘栅双极晶体管IGBT等开关器件）的相继出现和实用化，以及电力电子技术的发展，使得斩波控制直流调速得到更加广泛的应用。由于斩波控制直流调速的开关频率可在数千赫至数百千赫，使系统即使在电枢回路电感很小的情况下，电流也不会断续，从而可在很低转速时也能平稳运行，所以具有动态响应快、调速范围宽等优点。因此，斩波控制直流调速已在直流电动机调速中占据主导地位。

zhangli kongzhi

张力控制 （tension control） 对在两个加工设备之间做连续运动或静止的被加工材料所受的张力（拉力）进行自动控制的技术。在各种连续生产线上，各种带材、线材、型材及其再制品，在轧制、拉拔、压花、涂层、印染、清洗以及卷绕等工序中常需要进行张力控制。张力控制可以是恒张力控制，也可以是变张力控制。变张力控制是指张力按某一预先确定的规律变化，或根据工艺需要随时改变，或作为自动控制系统的一个参量参与调节的张力控制技术。张力控制的作用有：①保证连续生产加工过程能正常进行，即保证被加工材料在连续生产线的各部位上秒流量相等，从而达到既不堆料也不拉断的要求；②保证被加工产品的质量，如尺寸精度（厚度、宽度、截面形状等）、平直度、卷绕松紧、外形以及材质性能等达到标准要求。

为了控制张力，需要构成张力控制系统。因为张力只能在两个（或两个以上）具有驱动（或制动）力矩的工艺设备间形成，所以张力控制系统是在两个传动控制系统基础上构成的。其中一个传动控制系统作为张力控制系统的速度基准，称为速度基准系统；而另一个传动控制系统按张力要求建立负载，形成张力，实质是对速度基准系统按要求张力进行速度跟随，称为张力可控的速度跟随系统。张力控制的任务一般多放在后一系统上，所以人们习惯地只将后者称为张力控制系统。

张力控制系统由于应用场合、设备、构成原理不同而多种多样。按结构形式、控制原理可大致将其归纳为直接张力控制系统、间接张力控制系统、活套张力控制系统三大类。

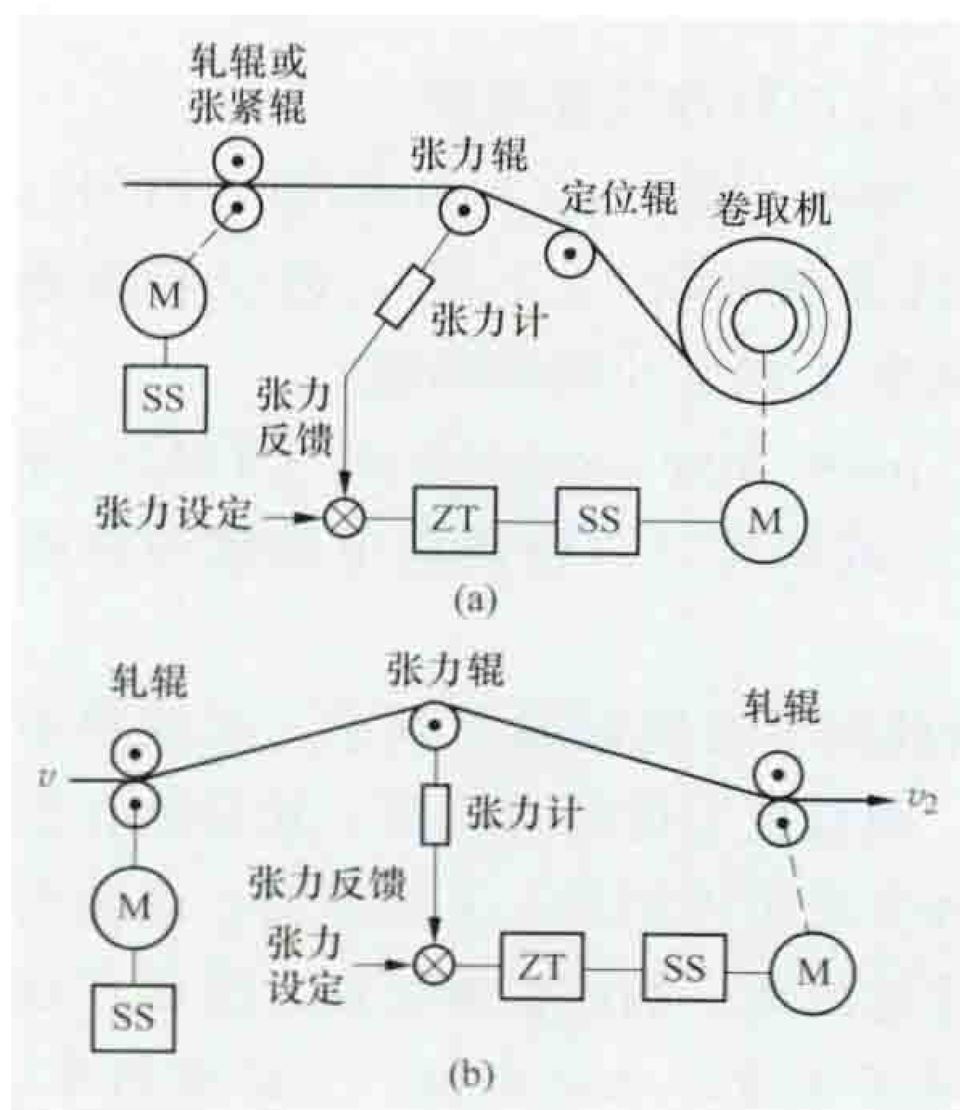


图1 直接张力控制系统
(a) 卷取机的控制系统；
(b) 轧机机架间的控制系统
ZT—张力控制；SS—传动控制系统

直接张力控制系统 通过张力检测环节（张力检测传感器）实现对张力的闭环反馈控制。卷取机和轧机机架间的直接张力控制系统分别如图1（a）和图1（b）所示。

实现直接张力控制，首先要有张力检测传感器（张力计）。它安装在张力测量机构的张力辊下（见图1）。张力计实为压力计，现用的压力计有压磁式、感应式、电阻应变片式等多种形式。

直接张力控制大多用于张力调节范围大、精度要求高及易于安装张力计的场合，或在无法构成间接张力控制系统时使用。

有时为了提高张力调节动态及静态性能，扩大张力调节范围，用间接张力控制实现粗调，起扰动补偿作用，用直接张力控制实现精调，两者合在一起构成张力复合控制。

直接张力控制和张力复合控制多应用于带材、箔材冷轧机或连续加工线的卷取机或其机架间、加工设备间的张力控制上。

间接张力控制系统 通过对形成张力的有关参量的检测与控制以及对张力扰动参量的检测和补偿，实现对张力的间接控制。

间接张力控制系统不使用张力计，构成方式灵活，种类繁多，在张力控制领域一直占据着统治地位。其主要形式有缠绕设备用的间接张力控制和连续加工设备用的间接张力控制两种。

缠绕设备用的间接张力控制系统 多用于带材的冷轧机、热轧机以及连续加工线的卷取机和开卷机的张力控制。缠绕设备（如图2中的卷取机）的特点是：稳态时可近似认为传动功率全部用于建立张力。张力F可表达为

$$F=C_1\frac{T}{D}=C_2\frac{Tn}{v}=C_3\frac{P}{v}$$

当用直流电动机传动时，上式可具体表达为

$$F=C_3\frac{P}{v}=C_4\frac{EI}{v}=C_5\frac{I\Phi}{D}$$

式中$C_1\sim C_5$为常数；P为传动（张力）功率；F为卷取张力；T为卷取力矩；D为卷筒直径；v为卷取线速度；n为卷筒转速；E、I、Φ分别为直流电动机的电动势、电流、每极磁通。

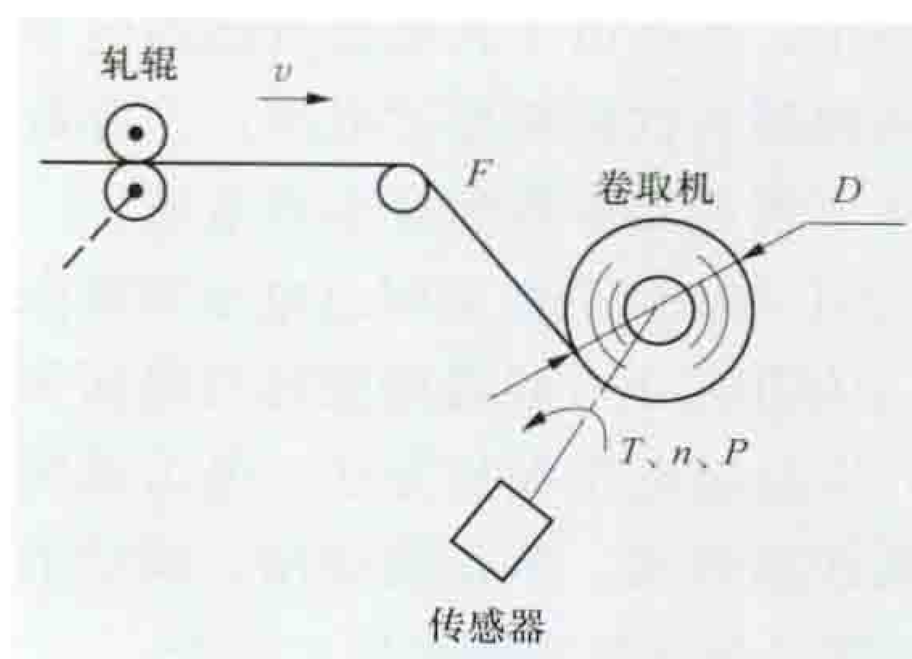


图2 缠绕设备传动示意图

按上述关系式，通过调节决定张力的不同参量，如电流、电动势、功率等，可构成功率间接张力控制系统、电流间接张力控制系统、电流-电动势间接张力控制系统。

（1）功率间接张力控制系统。通过控制直流电动机功率（$P=EI$），使其与卷取线速度成正比，实现张力的间接控制。此类方案中，电动机励磁电流可为恒值，也可按先升压后励磁即保证充分利用电动机最大转矩方式调节。

（2）电流间接张力控制系统。控制电流I使v/E或D/Φ与其成正比构成的间接张力控制系统。v/E或D/Φ可通过检测计算出。如果电动机为恒磁通，则系统简化为控制电流I与卷筒直径D成正比即可。

（3）电流-电动势间接张力控制系统。通过控制磁通Φ，使E与v（或Φ与D）成正比，即使$\frac{E}{v}=C\frac{\Phi}{D}$为常数，再控

制电流 I，使其值与张力成正比，构成的间接张力控制系统。

另外，在一些对张力控制要求不高的缠绕设备上，也常选用一些传动电动机（多为交流电动机）的自然或人工造成的机械软（跟随）特性，使之与设备的张力负载特性相匹配，构成简易的间接张力控制系统。

连续加工设备用的间接张力控制系统　连续加工设备的特点是传动负载转矩包括两部分：一部分用于加工（如轧机等）材料，另一部分用于建立张力。二者混在一起，同时存在且常难以分开。这类设备中除一部分可通过装设张力计或活套张力机构检测张力并控制外，还有一部分无法安装张力计或活套，如厚板连轧机、型钢连轧机、管材减径或拉拔机等。这类轧机设备的间接张力（多为小张力或零张力即无张力）控制系统可分为轧制负载转矩记忆间接张力控制系统、轧制负载转矩计算间接张力控制系统。

（1）轧制负载转矩记忆间接张力控制系统。轧材在第一机架轧制，还没进入第二机架形成连轧时，没有张力，故电动机负载全部为轧制负载，将其测出并记忆。待轧材进入第二机架形成连轧，建立张力时，控制第一机架的负载等于记忆之轧制负载不变，即在连轧时控制张力负载为零，达到无张力控制目的。此方案多用在控制精度要求不高的模拟系统。

（2）轧制负载转矩计算间接张力控制系统。建立计算轧制负载转矩的数字模型，通过相应传感器测量有关参量，利用计算机实时计算出轧制负载，进而控制传动电动机负载。当控制负载值与计算的轧制负载相等时，张力负载为零，即可实现无张力控制；如控制张力负载为某一值时即可构成对应值（多为小张力）的张力控制。

活套张力控制系统　在建立张力的两个设备间装设活套，利用诸如重锤、弹簧、气压缸、液压缸、各种力矩电动机及电动力矩控制装置等给活套按要求建立张力，再通过对活套位置（或角度）进行反馈控制，实现按要求张力进行速度跟随控制，即可构成活套张力控制系统。

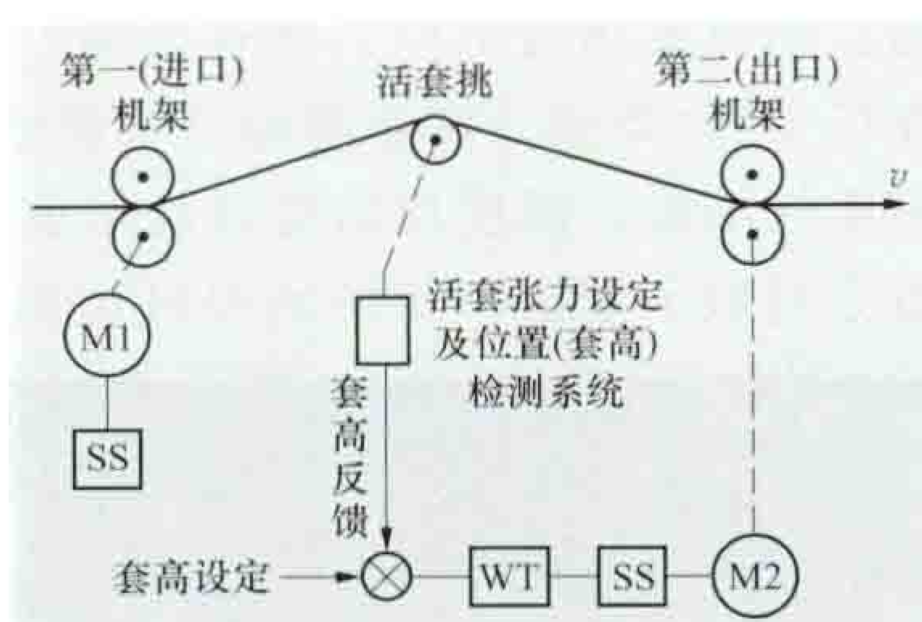


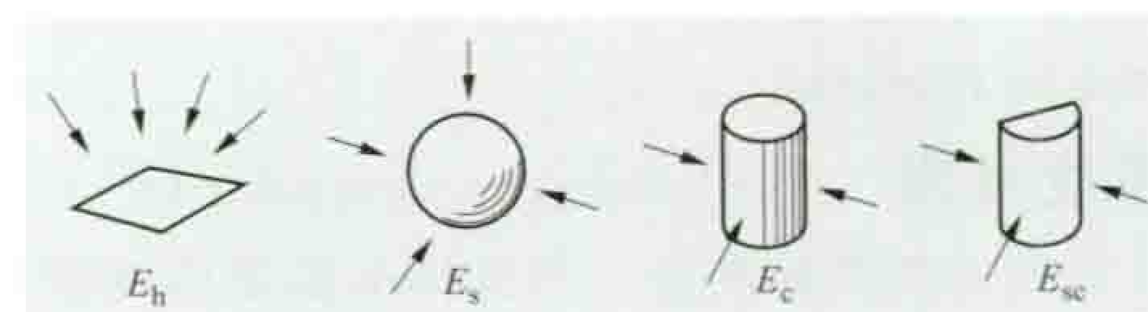
图3　热连轧机活套张力控制系统
WT—活套张力控制计算；
SS—传动控制系统

活套有活套挑、活套小车、活套坑、活套轮等多种形式。常用的热连轧机活套张力控制系统如图3所示。

zhaodu

照度　(illuminance)　照射到表面某处微面积上的光通量除以该面积所得的商，又称光照度，以符号 E 表示，单位为勒克斯（lx）。1lm 光通量均匀分布在 $1m^2$ 面积上产生的照度为 1lx，即 $1lx=1lm/m^2$。一个限定面积上的平均照度常用于定量表示照明水平。例如，长时间阅读时桌面照度需 200～500lx，夏季直射日光下的露天地面照度可达数万勒克斯，而月光下的照度只有几个勒克斯。

分类　照度可分为平面照度、标量照度、柱面照度、半柱面照度、初始照度、维持照度和使用照度。其中柱面照度、半柱面照度又称空间照度。平面照度与空间照度示意图如图所示。



平面照度与空间照度
E_h—平面照度；E_s—标量照度（平均球面照度）；E_c—平均柱面照度；E_{sc}—半柱面照度

平面照度　亦称平均平面照度。位于给定一点一个微小的水平面上的平均照度，符号为 E_h。GB 50034—2004《建筑照明设计标准》中，在室内照明场所，如办公室、会议室等区域均用平面照度评价照明效果。

标量照度　亦称平均球面照度。位于给定一点上一个微小的整个球表面上的平均照度，球直径趋近于无穷小。它表示给定点的受照量，而与入射光的方向无关，并且也不指明被照面的方向，因此称为标量照度，符号为 E_s。

柱面照度　在给定的一点上，一个很小的圆柱体曲面上的平均照度，圆柱体两个端面上接受的光不计，符号为 E_c。除非特殊说明，圆柱体的轴线一般与地水平面相垂直。平均柱面照度代表空间一点的平均垂直照度。

半柱面照度　在离地面一定高度的给定位置，一个微小的半圆柱体表面上的平均照度，符号为 E_{sc}。国际照明委员会（CIE）《城市照明指南》No.136（2000）和中国标准 JGJ/T 163—2008《城市夜景照明设计规范》中，在广场与公园等公共活动区用半柱面照度评价照明效果。

初始照度　照明装置是新的且房间表面清洁时，受照平面上的平均照度。照明设计时，不得以初始照度作为推荐照度标准值使用，初始照度应高于照度标准值。

维持照度　在必须换灯或清洗灯具和房间表面，或者同时进行上述维护工作时所得到的受照面的平均照度。国际上通常都采用维持照度作为推荐照度标准。任何照明装置所产生的照度，在使用过程中由于灯的流明衰减和光源、灯具及房间内表面上积灰污染，照度值都将逐渐降低。也就是说，维持照度一定低于初始照度，两者相差的多少取决于照明维护制度和维护周期。国际上大多数国家及中国标准规定的都是平均照度或平均亮度的维持值，也叫维持平均照度或维持平均亮度。照明设施或装置（光源、灯具及附件等）在规定时间内进行维护前，规定表面上的平均照度或亮度不得低于标准规定的维持平均照度或亮度值。

使用照度　整个维护周期内，受照平面上平均照度的中值。中国的体育照明设计标准采用使用照度规定照度标准。

术语　描述平面照度和空间照度的术语有照度均匀度和照明矢量。

照度均匀度　描述给定平面上照度变化幅度的指标，可用最小照度与平均照度之比，或最小照度与最大照度之比表示。室内照明通常采用前者。在工作环境中，要求工作面上的照度均匀度不小于 0.7。

照明矢量　用于描述空间一点上的光的方向特性的指标，以符号 $\boldsymbol{E}$ 表示。其量值为一个平面正反两侧的照度差的最大值，单位为 lx。这个平面的朝向是使这一照度差为最大值的方向，由较高照度向较低照度的矢量方向为正。空间各点的照明矢量表示该空间光流的方向。照明矢量与标量照

度之比简称矢量/标量比，用于表征三维物体的造型立体感。当 $E/E_s=1.2\sim1.8$ 时，效果比较满意。

zhaodu biaozhun

照度标准 （illuminance standard） 各类照明场所应达到的照度标准值。照度标准值是作为照明设计以及评定照明效果的依据，是照明标准或规范中一项重要的技术指标。

影响因素 照度标准的确定，要考虑照明对象、照明环境、人的视觉能力、视觉活动特征以及合理的能源消耗等多种因素。从视觉功效考虑，其影响因素主要有：①视看对象的大小（尺寸）；②视看对象表面亮度与颜色；③环境亮度；④视看对象与背景之间的亮度对比和颜色对比；⑤视看时间的长短；⑥视看人员的视觉能力；⑦视看对象的形状特征；⑧视看对象与其他周围物体的形状和质地上的差异；⑨预先是否了解视看对象在视野中出现的时间；⑩观察者对视看对象的视觉作业的经验等。

提高照度尽管有利于视觉效能的提高，但能源消耗也会随之增大。

制定方法 包括：①根据视觉功效制定照度标准；②根据视觉疲劳制定照度标准；③根据照度现场调研或试验制定照度标准；④根据经济分析结果制定照度标准。

分类 包括室内照明照度标准、室外照明照度标准。

室内照明照度标准 包括分级、取值、偏差、照度均匀度、照度标准值等方面内容。

（1）分级。GB 50034—2004《建筑照明设计标准》将照度分为0.5，1，3，5，10，15，20，30，50，75，100，150，200，300，500，750，1000，1500，2000，3000，5000lx。

（2）取值。作业面或参考平面上的维持平均照度值。

（3）偏差。在一般情况下，设计照度值与照度标准值相比较，可有±10%的偏差。

（4）照度均匀度。公共建筑的工作房间和工业建筑作业区域内的一般照明的照度均匀度，不应小于0.7；房间或场所内的通道和其他非作业区域的一般照明的照度值不宜低于作业区域一般照明照度值的1/3；对有彩电转播要求的体育场馆和对照明有特殊要求的医院手术室、博物馆特级陈列柜等的照度均匀度在相关照度标准中也都做了规定。

（5）各类建筑主要场所室内照明的照度标准值。

居住建筑：起居室的照度标准值，一般照明为100lx，混合照明为300lx。

公共建筑：一般阅览室的照度标准为300lx；普通办公室照度标准为300lx，高档办公室为500lx；一般商店营业厅为300lx，高档商店营业厅为500lx；影剧院观众厅为100lx（影院）、200lx（剧院）；旅馆客房一般活动区为75lx，床头为150lx，写字台台面为300lx；医院治疗室为300lx，化验室为500lx，手术室为750lx（未包括手术照明）；学校教室课桌面为300lx，黑板为500lx；博物馆中对光特别敏感的展品面为50lx，对光一般敏感的展品面为150lx，对光不敏感的展品面为300lx；展览馆一般展厅地面为200lx，高档展厅地面为300lx；候车（机、船）室地面为150lx（普通）、200lx（高档），中央大厅、售票大厅地面为200lx；体育建筑观众席座位面为100lx（比赛时），健身房地面为200lx。

工业建筑：根据中国6大区的机械、电子、纺织、制药等15大类工业建筑645个房间或场所的照明调查结果，并参考国内外照明标准综合分析确定了工业建筑通用房间或场所的照度标准值，如机电工业的机加工车间工作面为200lx；电子工业装配厂房工作面为300lx；纺织化纤工业织布车间工作面为300lx；食品工业糕点车间工作面为200lx；水泥工业主要生产车间地面为100lx；化学、石油工业阀门操作位为100lx；木业与家具制造的精细加工，磨光车间为750lx。

室外照明的照度标准 包括道路照明照度标准、景观照明照度标准和室外作业场地照度标准。

（1）道路照明照度标准。一级机动车道路的路面平均照度（维持值）为20/30lx，照度均匀度的最小值为0.4；二级机动车道路的路面平均照度为10/15lx，照度均匀度的最小值为0.35；三级机动车道路的路面平均照度为8/10lx，照度均匀度为0.3。人行道路照明的照度标准根据夜间行人的流量，分商业区和居住区确定其照度标准，如夜间人行流量大的居住区人行道路的路面平均照度为10lx，路面最小照度为3lx，最小垂直照度为2lx。

（2）景观照明照度标准。对室外建（构）筑物和其他景观元素照明的照度标准，根据建（构）筑物饰面材料的反射比、建筑所在城市规模大小以及环境区域的不同确定其平均照度，如建筑饰面材料反射比为0.6～0.8，所在城市为50万人口以上的大城市，环境区域为城市中心区的建筑泛光照明的照度标准值为150lx。对室外广场、公园等公共活动空间则用地面水平照度或距地1.5m处的半柱面照度作为照度标准，如广场绿地的照度为小于或等于3lx，人行道水平照度为5～10lx，公园人行道的地面最小平均水平照度为2lx，地面以上1.5m处的最小半柱面照度为2lx。图1所示为广州珠江新城夜景。

（3）室外作业场地照度标准。GB 50582—2010《室外作业场地照明设计标准》中对机场、铁路站场、港口码头、造（修）船厂、石油化工厂、加油站、发电厂、变电站、动力及热力工厂、建筑工地、停车场、供水和污水处理厂10大类室外作业场地工作面或参考平面上的维持平均照度标准值、照度均匀度以及作业面附近周围区域的照度值分别做了规定。如机场停机位地面为20lx；一般铁路客运有棚站台地面为75lx，大型铁路客运有棚站台地面为150lx；码头滚装场地地面为50lx；造船厂船坞坞底为15lx；加油站罩棚区地面为50lx；Ⅰ类室外停车场（大于400辆）地面为30lx。

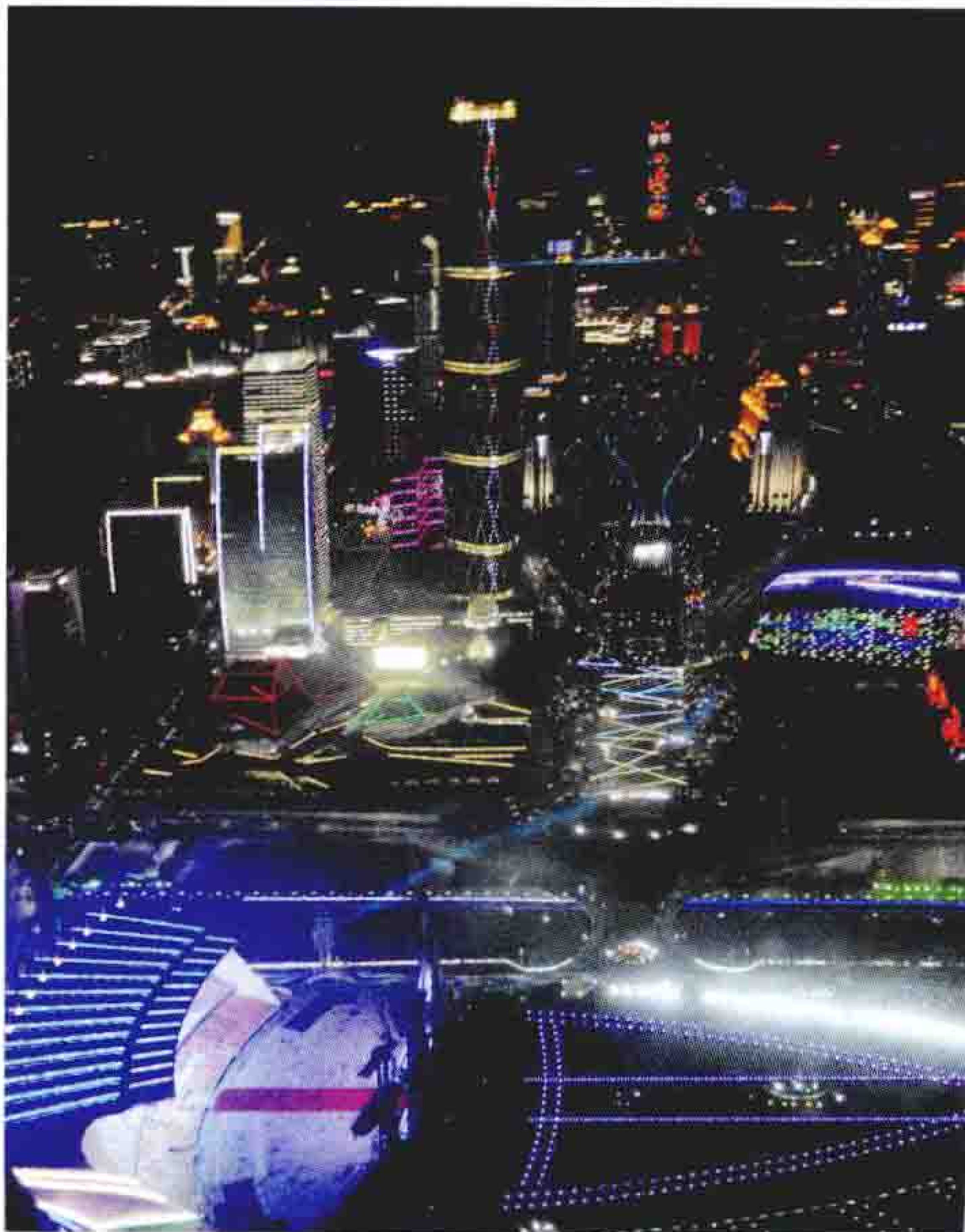


图1 广州珠江新城夜景

中国照度标准的发展 1956年国家建委批准颁布

的《工业企业人工照明暂行标准》（见图2），是中国第一本照度标准，包括工业企业人工照明的光源、照明方式、照明种类、照度、眩光的限制、照度的稳定、减光补偿系数、荧光灯照明等。1979年国家建委批准发布TJ 34—1979《工业企业照明设计标准》，为工业建筑照明设计人员在技术上提供了设计依据，也对中国照度标准的研发与新标准的制定具有重要参考价值。之后，在大量调查研究，吸取国际上，特别是国际照明委员会(CIE)研究成果的基础上，编制了一系列照明设计标准或规范。如TJ 34—1979《工业企业照明设计标准》、GBJ 133—1990《民用建筑照明设计标准》、GB 50034—1992《工业企业照明设计标准》、CECS 45—1992《地下建筑照明设计标准》、GB 50034—2004《建筑照明设计标准》、CJJ 45—2006《城市道路照明设计标准》、JGJ 153—2007《体育场馆照明设计及检测标准》、JGJ/T 163—2008《城市夜景照明设计规范》、GB/T 23863—2009《博物馆照明设计标准》、GB 50582—2010《室外作业场地照明设计标准》等，对推动中国照度标准的发展与技术水平的提高产生了重要影响。



图2　中国第一本照度标准

zhaodu jisuan

照度计算　(illuminance calculation)　在电气照明设计中，对照明装置在被照面上产生的照度进行的计算。照度计算有点光源点照度计算法和平均照度计算法两种。点光源点照度计算法能较精确地计算被照面某点的照度，适用于验算工作点的照度和工作面照度分布的均匀度。平均照度计算法只能计算被照平面的平均照度，求不出被照面的照度分布，所以只适用于比较均匀的照明系统。

点光源点照度计算　点光源产生的点照度可以用距离平方反比定律、余弦定律和余弦立方定律三个照度定律导出。它是光度测量和照度计算的基础。

距离平方反比定律，即点光源在与照射方向垂直的法平面上产生的照度与光源发光强度 I 成正比，与光源至被照面的距离 l 的平方成反比，见图1(a)。

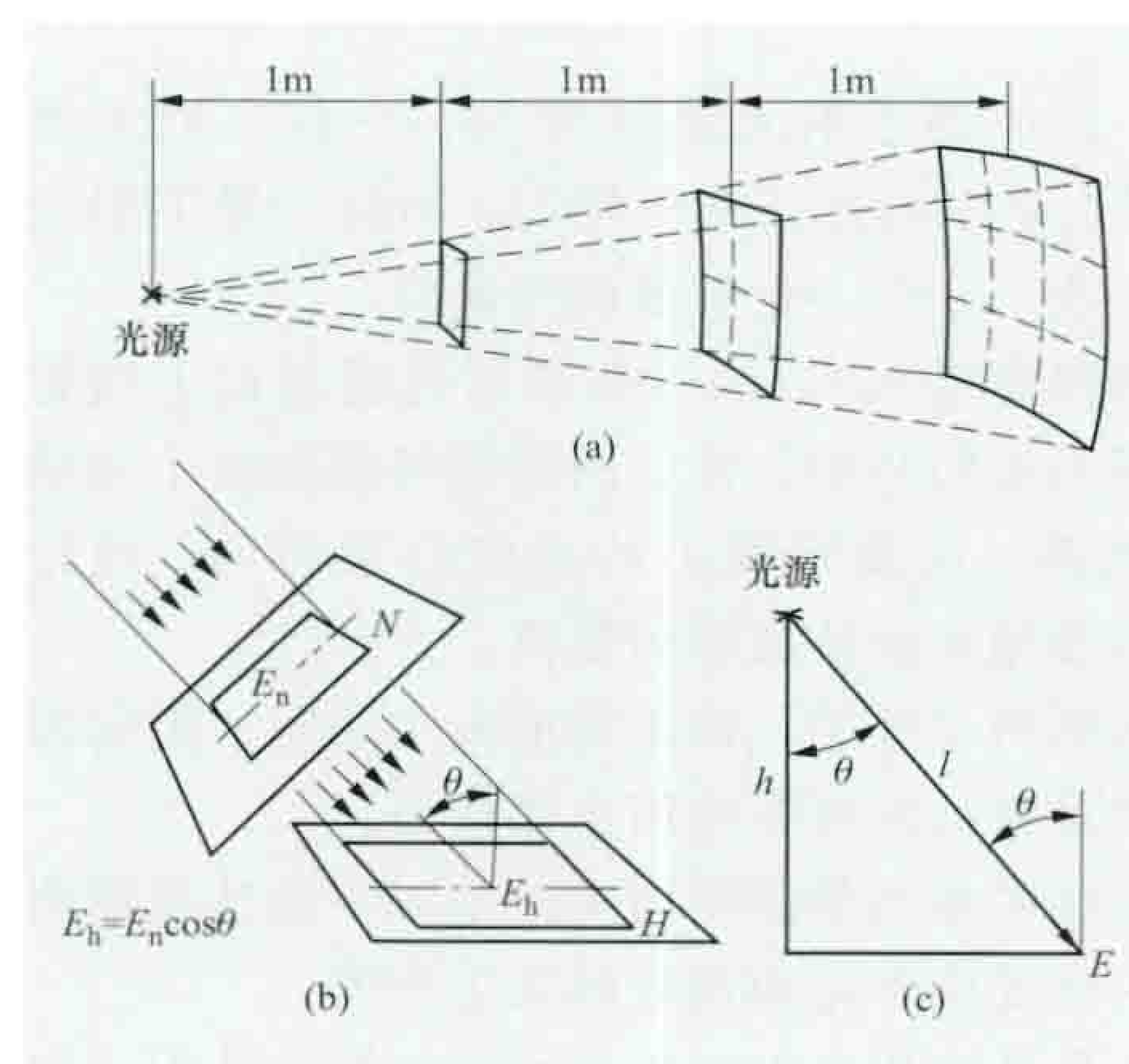


图1　照度定律图示

(a)距离平方反比定律；(b)余弦定律；(c)余弦立方定律

点光源点照度计算还需符合余弦定律和余弦立方定律，即点光源照射在水平面上的任一点产生的照度，与光源在该方向的光强及被照面法线与入射光线的夹角的余弦成正比，见图1(b)和图1(c)。

点光源点照度基本计算公式为

用距离平方反比定律导出　$E_n=\dfrac{I}{l^2}$

用余弦定律导出　$E_h=\dfrac{I}{l^2}\cos\theta$

用余弦立方定律导出　$E_h=\dfrac{I}{h^2}\cos^3\theta$

点光源点照度计算图如图2所示。点照度计算应用于实际电气照明设计中又称逐点计算法，较适用于局部照明、采用反射式照明器的照明、特殊倾斜面上的照明以及其他需要准确计算照度的场所。它可按照灯具形状和不同的布灯方式，分别按点状光源或线状光源求算。当光源尺寸与光源到计算点之间的距离相比小得多时，可将光源视为点光源。一般圆盘形发光体的直径不大于照射距离的1/5，线状发光体的长度不大于照射距离的1/4时，按点光源进行照度计算误差均小于5%。

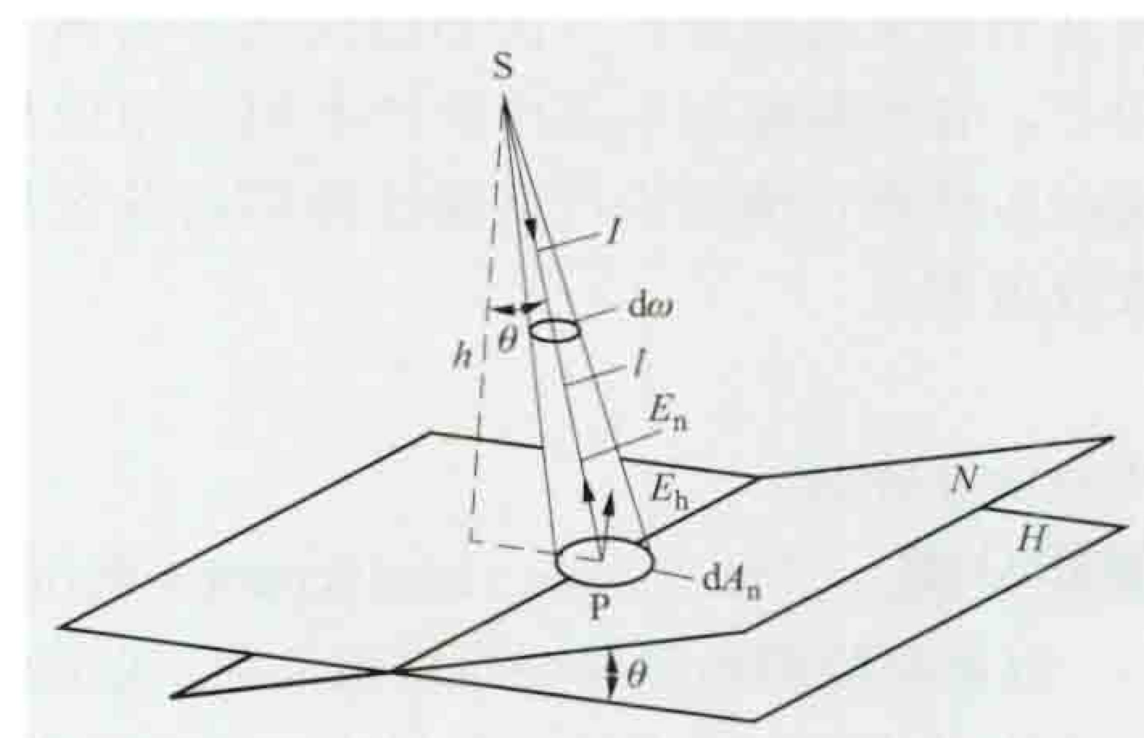


图2　点光源点照度计算图

S—点光源位置；I—光源在P点方向的发光强度，cd；h—光源距水平面的悬挂高度，m；l—光源至P点的距离，m；E_n—P点法线照度，即与入射光线垂直的指向平面上P点的照度，lx；E_h—水平面上P点的照度

逐点计算法可以计算出水平面、垂直面和倾斜面上的不同照度（如图2所示）。常采用的求水平面最小照度的计算公式为

$$E_{min}=\frac{\Phi K\,\Sigma e}{1000}$$

式中 E_{min} 为最小照度，lx；Φ 为每个光源的光通量，lm；K 为维护系数，是考虑光源光通量的衰减、灯具和房间表面污染引起的照度降低，通常取0.6～0.8；Σe 为各型照明灯具（其光源光通量为1000lm）在计算点上所产生的平均照度之和，lx。

e 值一般可由下式求得

$$e=\frac{I_a\cos^3\alpha}{h^2}$$

式中 I_a 为计算点方向的发光强度，cd；α 为光轴线与光源在被照点方向射线间的夹角；h 为计算高度，m。

设计时，式中 e 值可根据灯具厂提供灯具的等照度曲线查得，然后按照规定的照度值，用求每个灯具的光源光通量的计算式，算出灯具光源的光通量 Φ (lm)，用以选择光源功率(W)，光源的光通量能与求算出的光通量数值接近为最佳。

平均照度计算　平均照度计算通常采用利用系数法（或称流明法）。工作面上的平均照度 E 系由光源光通量的直射分量以及经房间的天棚、地面、墙壁的多次反射分量所造成。

在工作面上直接或间接投来的光通量之和 $\Sigma\Phi$，与设置在受照房间内照明灯具所发出总光通量 $N\Phi$ 之比称为利用系数 η。平均照度 E 和所需灯数 N 可按下列公式分别求得

$$E=\frac{\Phi N\eta K}{S}$$

$$N=\frac{ES}{\Phi\eta K}$$

式中 E 为所需平均照度，lx；Φ 为每个灯泡的光通量，lm；N 为所需的灯数，个；K 为维护系数，是考虑光源光通量的衰减、灯具和房间表面污染引起的照度降低，通常取0.6～0.8；S 为房间面积，m^2；η 为光通量利用系数。

各国采用的利用系数基本原理是相同的，不同之处主要是利用系数的计算方法和设定条件有所不同。在设计应用上，各国都根据本国所生产不同类型的照明器的发光强度分布特性，编制成可供设计使用的各类照明器的利用系数数值表。

zhaoming fenlei

照明分类 (illumination classification; lighting classification)

以照明使用性质划分的照明类别。以照明设备的安装部位或使用功能而构成的基本制式，称为照明方式。电气照明种类繁多，世界各国归类方法、名词术语不尽相同。不同种类照明的供电方式、电源切换时间和持续工作时间以及照度差异很大。

按照明的作用分类 中国国家标准的照明设计标准中，照明分类、名词术语已与国际照明委员会（CIE）取得一致。中国以前按照明作用仅将照明分为常用照明（即正常照明）和事故照明（即应急照明）两类。20世纪90年代则分为正常照明、应急照明、值班照明、警卫照明和障碍照明五类，其中应急照明包含有备用照明、安全照明和疏散照明。

正常照明 在正常情况下使用的、固定安装的室内外人工照明。它是电气照明的基本种类，在照明场所，对产生照度标准指定的照度指标起主要的作用。标准要求工作场所均应设置正常照明。

正常照明装设在如办公、会议、图书阅览、工厂主厂房、辅助生产用建筑物和生活福利建筑物的所有室内外场所，以及在夜间有人工作的露天场所、有运输和有人通行的露天场地和道路等。

正常照明可以单独使用，也可以与应急照明、值班照明同时使用，但控制线路必须分开。

应急照明 在正常照明因电源失效而熄灭的情况下，供人员疏散、保障安全或继续工作用的电气照明。

值班照明 非工作时间，为值班所设置的照明。值班照明可利用正常照明中能够单独控制的一部分或利用应急照明的一部分或全部，但在开关控制上应该有独立的控制开关。

警卫照明 用于警戒而安装的照明。警卫照明的设置，要按保安部门的要求，在警卫范围内装设。

障碍照明 在可能危及航行安全的建筑物或构筑物上安装的标志照明。障碍照明的装设，应严格执行所在地区航空或交通部门的有关规定。飞机场周围的较高建筑物或构筑物，如烟囱、水塔等对飞机的安全起飞和降落威胁较大，应按各地民航部门的有关规定装设障碍照明。对于有船舶通行的航道两侧的建筑物，在低水位的河边和高水位的河中心，船舶在夜间通行易发生事故的环境和场所，都应按照交通部门的有关规定，装设航道障碍照明。

按照明方式分类 按照明方式有一般照明、分区一般照明、局部照明和混合照明之分。

一般照明 为照亮整个场所而设置的均匀照明。它是不考虑特殊局部的需要，为照亮整个场地而设置的照明。在整个房间的被照面上所产生的照度相同的一般照明称为均匀的一般照明。一般照明方式的照明器在被照空间多采用均匀布置。凡不适合装设局部照明或采用混合照明不合理时，宜采用一般照明方式；在公共场所及生活福利的房间内，都应采用一般照明方式。

分区一般照明 为照亮工作场所中某一特定区域而设置的均匀照明。同一场所内的不同区域有不同照度要求时，应采用分区一般照明。分区一般照明特别适合于大空间的照明，如大型商业空间的照明，由于空间大，商品种类多、往往将大空间分割成若干售货区。各个售货区销售的商品特征不一，对照明的照度水平、照明用光的方向性与扩散性、照明光源的亮度、颜色的要求各不相同。如果使用一般照明，很难表现出商业空间的照明特征，也不利于照明节能；采用分区一般照明，则能较好地解决上述问题。

局部照明 特定视觉工作用的、为照亮某个局部而设置的照明。在一个工作场所，不允许只装设局部照明而无一般照明。

混合照明 由一般照明与局部照明组成的照明。其工作面上的照度由一般照明和局部照明共同产生。工业厂房的照明多采用一般照明和混合照明两种方式。

按照明器的光分布特性分类 有直接照明、半直接照明、均匀漫射照明、半间接照明和间接照明。

直接照明 利用照明器下射90%～100%的辐射光通量所形成的照明。根据照明器反射面的材料、饰面和轮廓形状以及采用的遮光角或控光材料，照明器的配光从宽扩散到非常集中的配光，可以有很大的区别。

半直接照明 照明器的光分布中有60%～90%的辐射光通量向下投射，但是有少量上射光通量照明顶棚和墙面的上部所形成的照明。上射光通量能使阴影柔和，并改善室内亮度分布。

均匀漫射照明 照明器的下射和上射光通量大致相等时所形成的照明。

半间接照明 照明器上射光通量为60%～90%时所形成的照明。它的特点是室内光分布较均匀，同时少量下射光通量又能在视觉作业上产生一定程度的方向性。

间接照明 将照明器90%～100%辐射光通量向上照射顶棚和墙的上部所形成的照明。良好的间接照明使整个顶棚成为照明的二次光源。为使顶棚上的亮度分布均匀，设计时，应使照明器与顶棚间保持足够的距离。

其他分类 在照明设计中，恒定辅助人工照明、定向照明、泛光照明和特殊场所照明等应用也比较多。

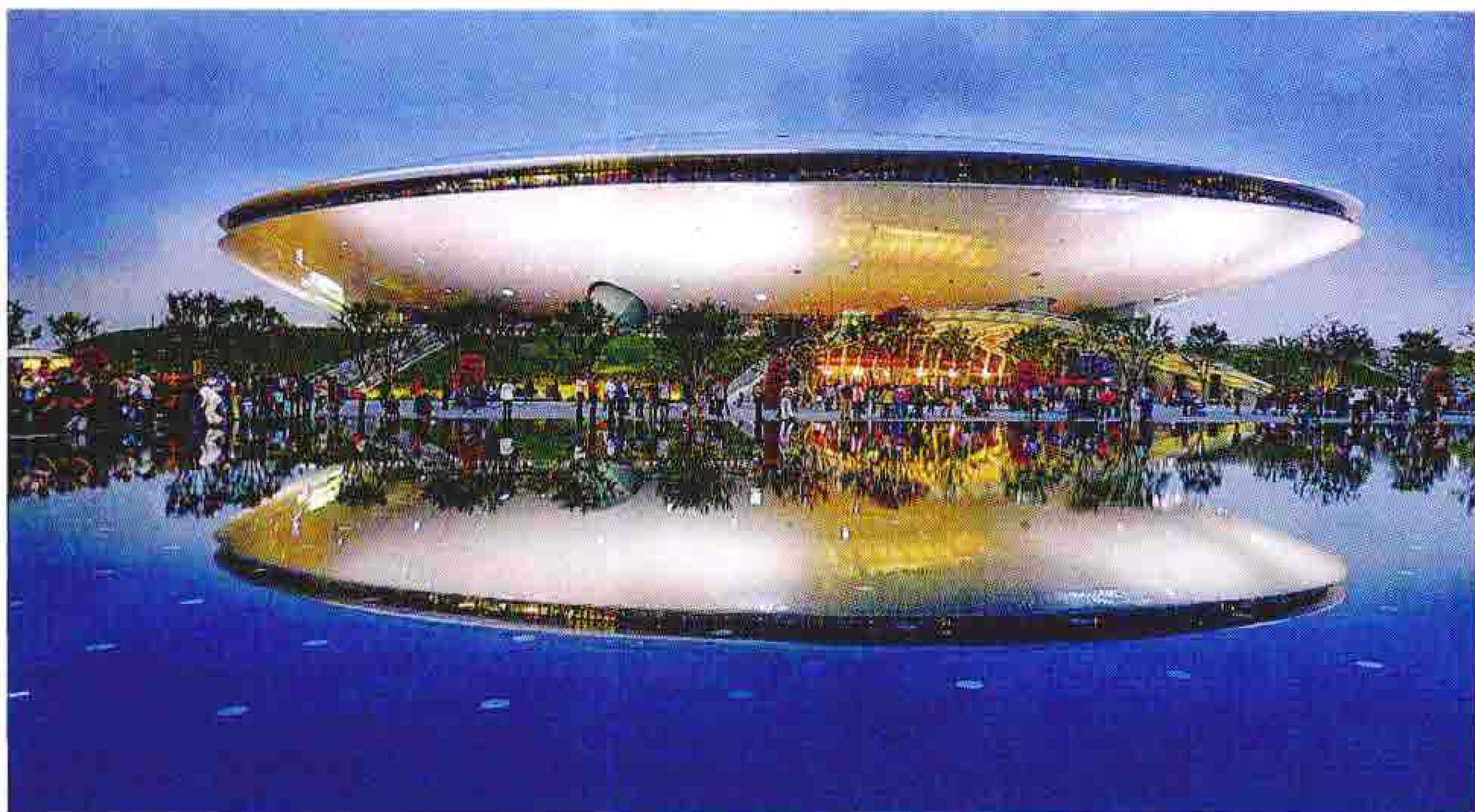
恒定辅助人工照明是当单独使用天然采光不能达到照明要求时，为补充天然光的不足而设置的人工照明。

定向照明是从最佳的用光方向把光线投射到作业面或物体上的照明。

泛光照明是一种利用泛光灯照明建筑物立面或室外广场、海港、工地等场所的照明。

特殊场所照明的种类很多，如防爆照明、水下照明、障碍照明和影视照明等均属于这类照明。

另外，随着电子计算机在照明中的大量应用以及人们对能源和环境问题的普遍重视，诸如智能照明、有视觉显示装置(VDU)场所的照明、节能照明、利用空调灯具的照明等不断出现。随着照明技术的发展，照明的类别将不断增多，分类方法也将越来越科学和实用。图示为上海世博会光与影效果图。



上海世博会光与影效果图（刘镜法　摄）

zhaoming gonglü midu

照明功率密度　(lighting power density，LPD)

单位面积上的照明安装功率（包括光源、镇流器或变频器等），单位为 W/m^2。它是评价照明节能效果的重要技术指标。为了评价照明节能效果，在美国、日本、俄罗斯和中国等的照明设计标准或规范中，除规定照度标准外，还将照明功率密度作为节能的评价指标列入标准。中国的 GB 50034—2004《建筑照明设计标准》、CJJ 45—2006《城市道路照明设计标准》均规定了相应场所达到一定照度前提下的照明功率密度限制，并作为强制性条文要求严格执行。照明设计时实际的照明功率密度应小于或等于标准规定的照明功率密度最大限值。

降低照明功率密度的技术措施和方法：①正确选择照度标准值；②选择最佳的照明方式；③选用高效的节能电光源；④选用高效节能的照明灯具；⑤选用高效节能的调控设备。

zhaoming kongzhi

照明控制　(lighting control)　对照明装置或照明系统的工作特性所进行的调节或操作。可实现点亮、熄灭、亮度和色调的控制等。

照明控制方式分为手动照明控制、半自动照明控制和自动照明控制。

手动照明控制　通过人直接操纵开关实现的照明控制。手动开关分为机械式和电子式。

机械式手动照明控制　品种繁多，其手动操作的开关有拉线式、按键式、推拉式、旋转式。机械式开关的工作原理都是通过简单的机械装置，将连接电光源的通电回路接通或切断，以实现灯的点亮或熄灭的控制。这类开关结构简单、安全耐用、使用广泛。

最简单的机械开关是单刀单掷开关，其控制原理如图 1 所示。将开关 S11 串联在有光源的照明回路中，在 a、b 两端施加电压 U_i，当 S11 闭合或打开时，光源点亮或熄灭。

为满足特殊控制功能，需要多个单刀多掷或多刀多掷开关组合使用。图 2 所示是两个单刀双掷开关与光源回路串联组成的两方位控制系统，开关 S21 或 S22 都可随意点亮或熄灭光源。图 3 所示是由两个单刀双掷开关、一个双刀双掷开关与光源回路串联组成的三方位控制系统，其中任一个开关都可随意点亮或熄灭光源。依此规律可用两个单刀双掷，n（0 或正整数）个双刀双掷开关组成 $n+2$ 个多方位控制系统。这类开关多用于建筑物的楼梯、走廊、车间、库房、影剧院等场所。每个开关都可以点亮或熄灭同一个光源，而不受其他开关状态的影响。

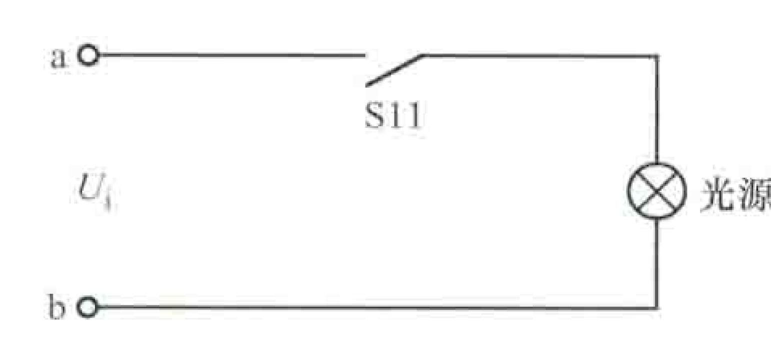


图 1　单刀单掷式开关控制原理

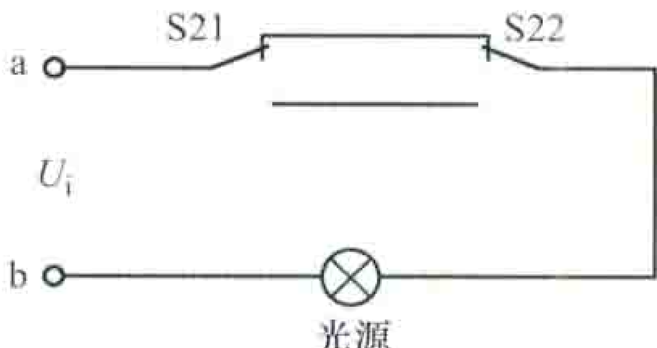


图 2　双单刀双掷开关控制原理

电子式手动照明控制　为了实现机械式开关不能满足的某些特殊性能而设计制作的手动开关，按操作方式的不同有缓冲式、轻触感应式和调节式。

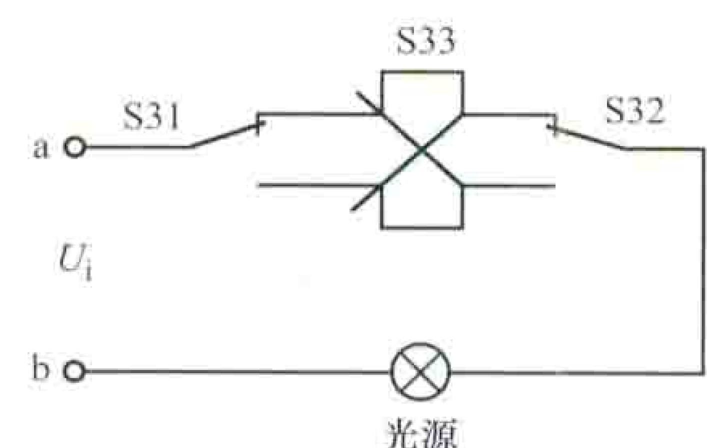


图 3　双单刀双掷与双刀双掷组合开关控制原理

缓冲式电子控制开关是为延长光源寿命而设计的，也称为软开关。图 4 所示是一种具有缓冲功能的开关控制原理图。图中 S41 为普通机械开关，当 S41 闭合接通电源后，由于电子线路的缓冲作用，扼制了光源冷态电阻 R_L 造成的高于额定电流 10～20 倍的瞬间冲击电流，实现了开渐亮、关渐暗的控制，消除了冲击电流对光源的损害，延长了光源的寿命。

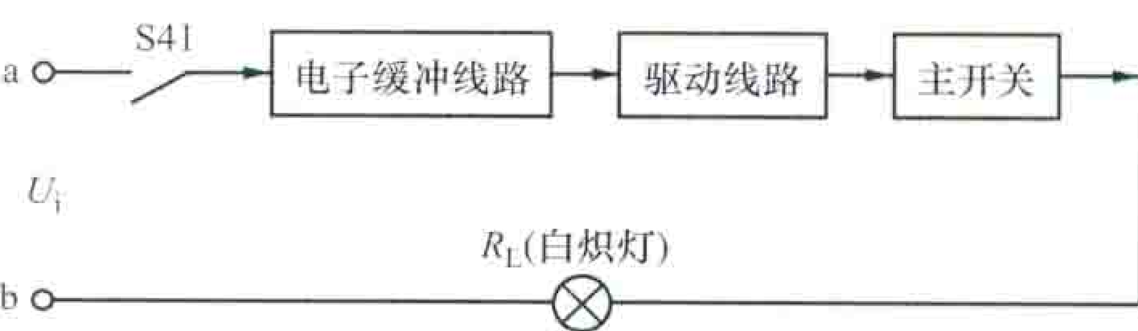


图 4　缓冲式电子控制开关控制原理

轻触感应式手动开关是为了方便使用和有助于环境装饰而设计的开关装置。它是用微小的电信号来实现对灯的控制，手感好，安全耐用。其控制原理如图 5 所示。图中 S51 为轻触式微动开关，当 S51 受到轻轻触动，便有一个电信号送到电子控制线路，电子线路将信号进行放大处理后驱动主开关点亮或关闭光源。主开关一般由晶闸管或继电器等组成。

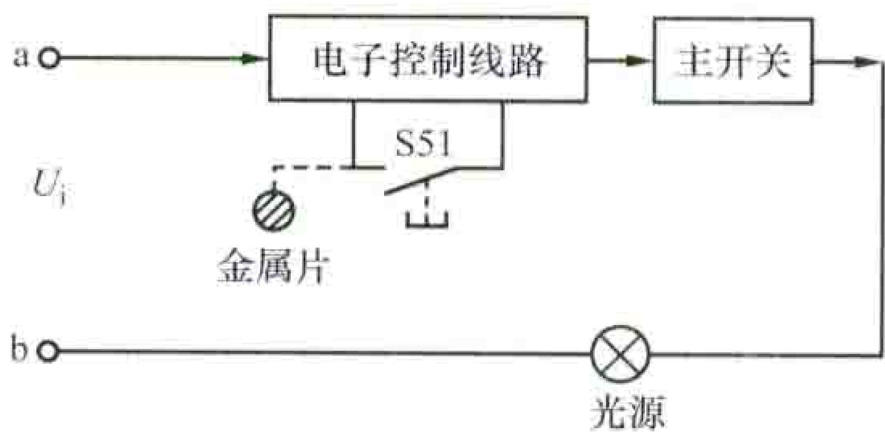


图 5　轻触感应式开关控制原理

调节式开关是在轻触感应式的基础上通过使用不同功能的电子控制线路，实现对白炽灯、卤钨灯类热辐射电光源亮度的调节，如图 6 所示。具有这种亮度调节功能的开关称为调光开关。对于荧光灯、高压气体放电灯、LED（发光二极

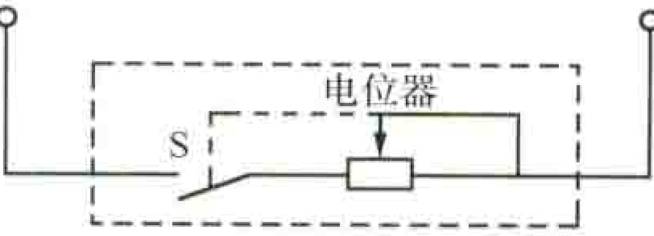


图 6　调节式开关的电位器

管灯）等电光源，因其发光原理不同，除采用手动开关外，尚需分别采用特有电子装置进行控制（见调光照明控制）。

半自动照明控制 电子式手动开关与自动控制功能相结合构成了半自动开关装置。按动开关点亮一盏灯，经过几分钟后，这盏灯可自动熄灭。具有这种功能的开关称为延时开关，是半自动开关的一种。（见定时照明控制）

歌厅、舞台常见的旋转、扫描、点射、频闪、流水式灯光变换，都是经过人为地开关，控制一种或一组转动机构或电子控制线路，创造出五光十色、千变万化的彩色世界，给人以梦幻般的享受。这种开关与转动机构或电子线路组成了一个半自动灯光控制系统。

遥控开关也属半自动开关，它由指令发射机和信号接收机及执行机构三大部分组成。当人为地操作发射机发射出指令后，接收机把接收到的指令信号经解码放大后，驱动相应的执行机构，对光源进行点亮、熄灭、明暗调节等远距离控制。遥控开关分有线遥控和无线遥控两大类。

有线遥控开关是将发射信号通过导线传输给接收机，传输导线可用专用电缆，也可利用市电力线或电话线实现载波遥控，如图7所示。无线遥控开关是根据不同需要将指令信号以电磁波、声波、超声波、次声波或光波等形式，通过空间传送给接收机，实现对光源的控制，如图8所示。

图7 有线遥控开关原理框图

自动照明控制 不用人为操作，光源的亮度和色调可根据人们事先约定的条件和光源周围环境亮度、音响、时间等物理量的变化而实现自动调节。自动照明控制应用很广，当人们走近黑暗的场所，灯光自动点亮，经一定延时后自动调暗、关闭；舞台灯光、喷泉彩灯，随着声乐的起伏而忽明忽暗，红绿交映；为保证某一区域的照度恒定，一组灯光自动地明暗调整；路灯、航标灯、畜牧场照明灯昼关夜开，都可以用自动照明控制来实现。（见感应照明控制）

图8 无线遥控开关原理框图

用于照明控制的微波扫描、电容式近距感应等是在半自动照明控制的基础上增加相应的传感器和具有比较、分析功能的电子控制线路实现的（如图9所示）。传感器把感知的信号转换为电信号，经电子控制线路比较、分析、处理后，驱动主开关来调节光源的亮度或颜色。

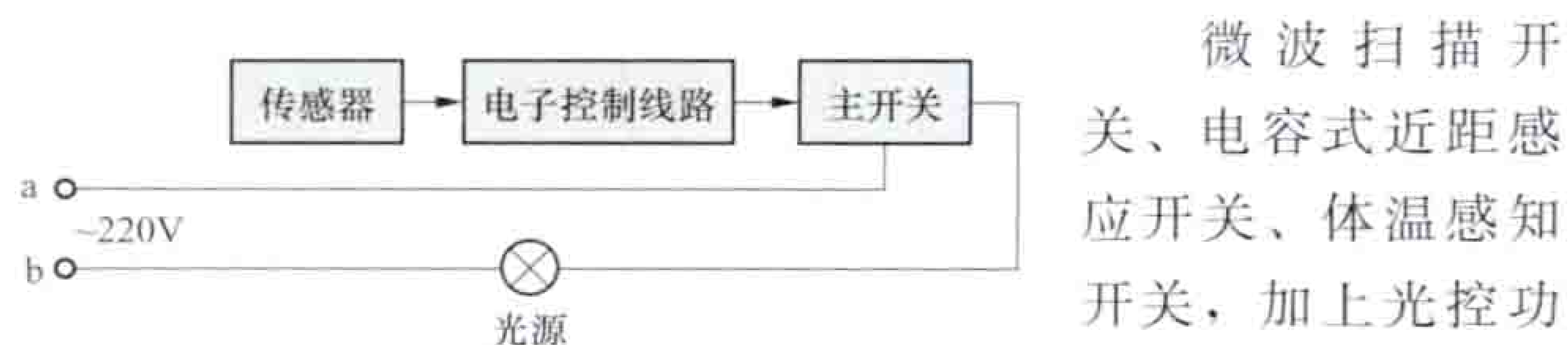


图9 照明自控原理框图

微波扫描开关、电容式近距感应开关、体温感知开关，加上光控功能，用于住宅楼道、走廊、厕所、门厅等，均可实现全自动延时照明控制。

利用气敏、磁力、温度、湿度、压力等物理量和液位、位移、障碍等状态量都可实现自动照明控制，这些控制多用于特殊场所的警告性或标志性照明。

停电自锁照明控制、应急照明控制、智能照明控制也都是自动照明控制。

停电自锁照明控制也称二次开关，当光源在开启状态，发生了断电现象，通电后，由于二次开关作用，光源处于熄灭状态。使用二次开关可自动消除因停电忘记关灯，而来电后灯光长明的现象，既安全又节电。

应急照明也称为不间断照明。当正常供电电源因故停电时，备用的应急电源立即向光源供电，保持光源的点亮状态。应急照明控制设施已成为宾馆、饭店、商店、礼堂、影剧院必不可少的照明自控设施。

智能照明控制也可称为模糊照明控制，是一种具有记忆、分析、判断及综合处理功能的高级自动照明控制系统。一般由光敏、音频、红外、微波等多种传感器，计算机及开关，调光、频闪、旋转、变色等多功能控制器组成，如图10所示。由各路传感器接收各种物理量或状态量的随机状态，转换成电信号传送给计算机进行存储、分析、判断，分析结果经放大器放大后驱动各路控制器，对相应的光源进行控制。还可由计算机给出随机控制信号，通过控制器产生一种千变万化而无规律可循的特技照明效果。

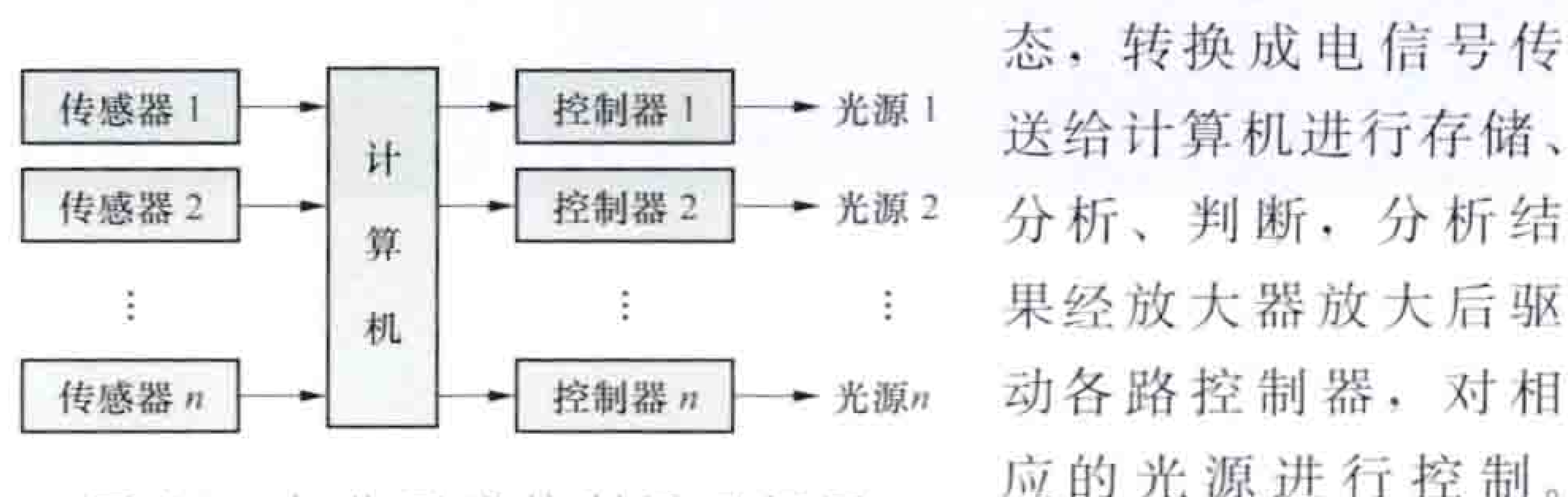


图10 智能照明控制原理框图

智能照明控制系统的特点：①系统集成性。集计算机技术、计算机网络通信技术、自动控制技术、微电子技术、数据库技术和系统集成技术于一体。②智能化。具有信息采集、传输、逻辑分析、智能分析推理及反馈控制等智能特征。③网络化。传统的照明控制系统大都是独立的、本地的、局部的系统，不需要利用专门的网络进行连接，而智能照明控制系统可以是大范围的控制系统，需要包括硬件技术和软件技术的计算机网络通信技术支持，以进行必要的控制信息交换和通信。④使用方便。由于各种控制信息可以以图形化的形式显示，所以控制方便，显示直观，并可以利用编程的方法灵活改变照明效果。

zhaomingqi

照明器 (illuminator; light fitting) 由光源和控照器、支撑结构组成的一种照明器件，又称灯具。能透光、配光和改变光源光分布。照明器的基本功能有：①改变光源光通量的空间分布，使光源光通量重新分配到人们需要的范围内；②保护视觉，防止或减轻高亮度光源产生的眩光；③固定和保护光源，并将灯与电源相连；④美化和装饰环境，通过照明器的优美造型和合适的外观颜色来满足人们的审美要求。

分类 照明器的种类繁多，按光通量在空间的分布情况，分为直接、半直接、均匀漫射（直接-间接）、半间接和间接配光（见照明分类），见表。其中直接配光照明器又分为窄配光、余弦配光、宽配光和均匀配光4类（见图）。道路照明器，按水平面的配光形状可分为全向配光和双向配光两类；按限制眩光的程度可分为截光、半截光和非截光3类。

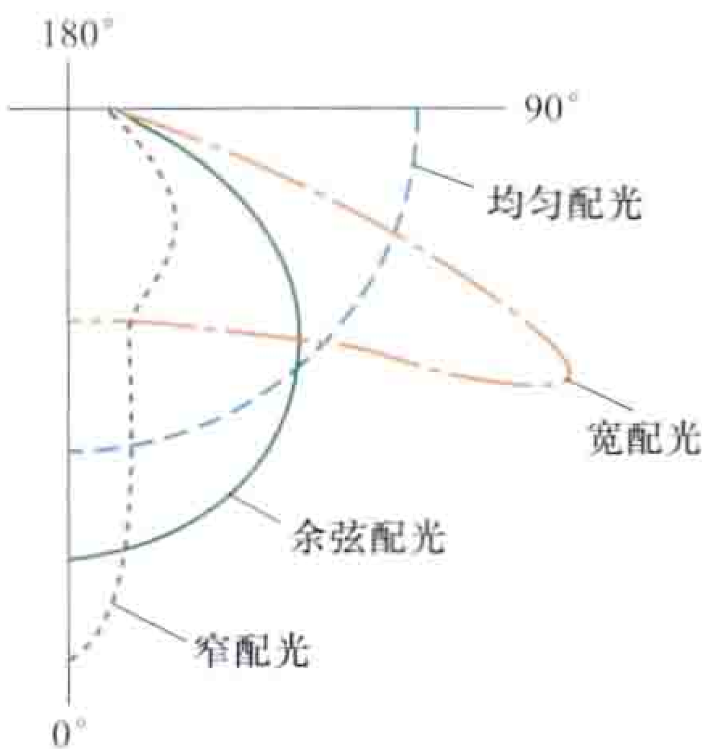
照 明 器 分 类

类 别	照明器光通量在空间的分布	
	上 半 球	下 半 球
直 接	0～10%	90%～100%
半直接	10%～40%	60%～90%
均匀漫射	40%～60%	40%～60%
半间接	60%～90%	10%～40%
间 接	90%～100%	0～10%

按照明器抗电击（见人体触电）程度分为 0、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ四级。0 级照明器：不需要接地保护的照明器。Ⅰ级照明器：需接地保护的照明器。Ⅱ级照明器：不接地，它是在一般的绝缘上再加一附加绝缘，又称双重绝缘灯具或外层绝缘照明器。Ⅲ级照明器：供电为交流电 30V 以下，直流电 45V 以下，人接触带电部件无电击危险的照明器。

按对水或异物侵入的保护程度将防水照明器分为防漏型、防雨型、防溅型、防喷射型、耐水型、防浸型、水中型、防湿型等 8 类，总称防水型；按防止异物侵入照明器分为防尘型和耐尘型两类。

对有煤气、蒸汽或其他腐蚀气体等场所使用的照明器，按其保护结构可分为耐压型、增加安全型和耐盐型等。



直接配光照明器典型配光曲线图

照明器还有按光源，照明器形状、材料、使用场所、使用目的、安装手段、安装状态等进行的分类。

常用照明器　包括：吊装式照明器、枝型照明器、吸顶式照明器、嵌装式照明器、空调式照明器、墙壁照明器、立式照明器、台式照明器、应急照明器和疏散标志照明器。

（1）吊装式照明器。安装于建筑物上，用软线、链子、各种管线等吊装的照明器。

（2）枝型照明器，又称花灯。同时布置多个光源和多个透射或折射的小型透明体，利用折射光、反射光或间接光等创造出华丽气氛的吊装式照明器。中国古代的宫殿照明和欧洲中世纪的宫廷照明中，是在枝型照明器上插上蜡烛或设置油灯，现在经常使用仿蜡烛的小灯泡作这种照明器的光源，创造出豪华的感觉，以满足人们的艺术享受和审美要求。

（3）吸顶式照明器。直接安装在室内顶棚上的照明器，也称吸顶灯。

（4）嵌装式照明器。将照明器的全部或一部分凹进暗装在建筑物顶棚或墙上的照明器。

（5）空调式照明器。与空调系统组合使用而特别设计的照明器。

（6）墙壁照明器，又称壁灯。安装在墙上的照明器。

（7）立式照明器，又称落地灯。竖立在地面上，应用高支柱固定，可移动。

（8）台式照明器，又称台灯。放在家具或桌子上面，应用低支柱固定，可移动。

（9）应急照明器或应急照明灯。发生火灾等灾害而停电时，为了抑制由于黑暗引起的心理紧张感，照明避难路线，从常用电源自动切换到备用电源，持续点亮的一种照明器。这种照明器按安全法规要求，在规定时间内保持必要的照度。

（10）疏散标志照明器，又称疏散导向照明器。发生火灾等灾害而停电时，从常用电源自动切换到备用电源点灯，以示出入口位置的照明器。

灯具效率　在相同的使用条件下，灯具发出的总光通量与灯具内所有光源发出的总光通量之比。它是评价照明器质量的一个重要技术指标，也是表述灯具对光源光通量利用程度的技术指标。照明器的光源所发出的光通量，一部分被照明器吸收，一部分射向周围空间，所以照明器的效率小于 1。各种照明器的效率既可用计算方法计算，也可用仪器进行测量，通常可在照明器生产厂的样本中查到。一般来说，灯具效率同灯具材料的反射比和透射比成正比。开敞式灯具的效率取决于灯具开口面积与反射罩面积之比值及反射罩的形状。为提高灯具效率，灯具反射器的大小与形状设计应根据所用光源的体积大小、发光特性确定，尽量减少光在灯具内的多次反射所造成的光损失；对带透光罩的灯具，为提高灯具效率，透光罩材料的透射比要高。

zhenkong dianhulu

真空电弧炉

（vacuum arc furnace）　在真空中熔炼金属的直接电弧炉。它用于在真空中由电弧热（见电弧加热）熔化钛、钼等难熔金属和活泼金属，精炼合金钢等，电极一般由被熔炼金属制成，在水冷结晶器中形成铸锭。

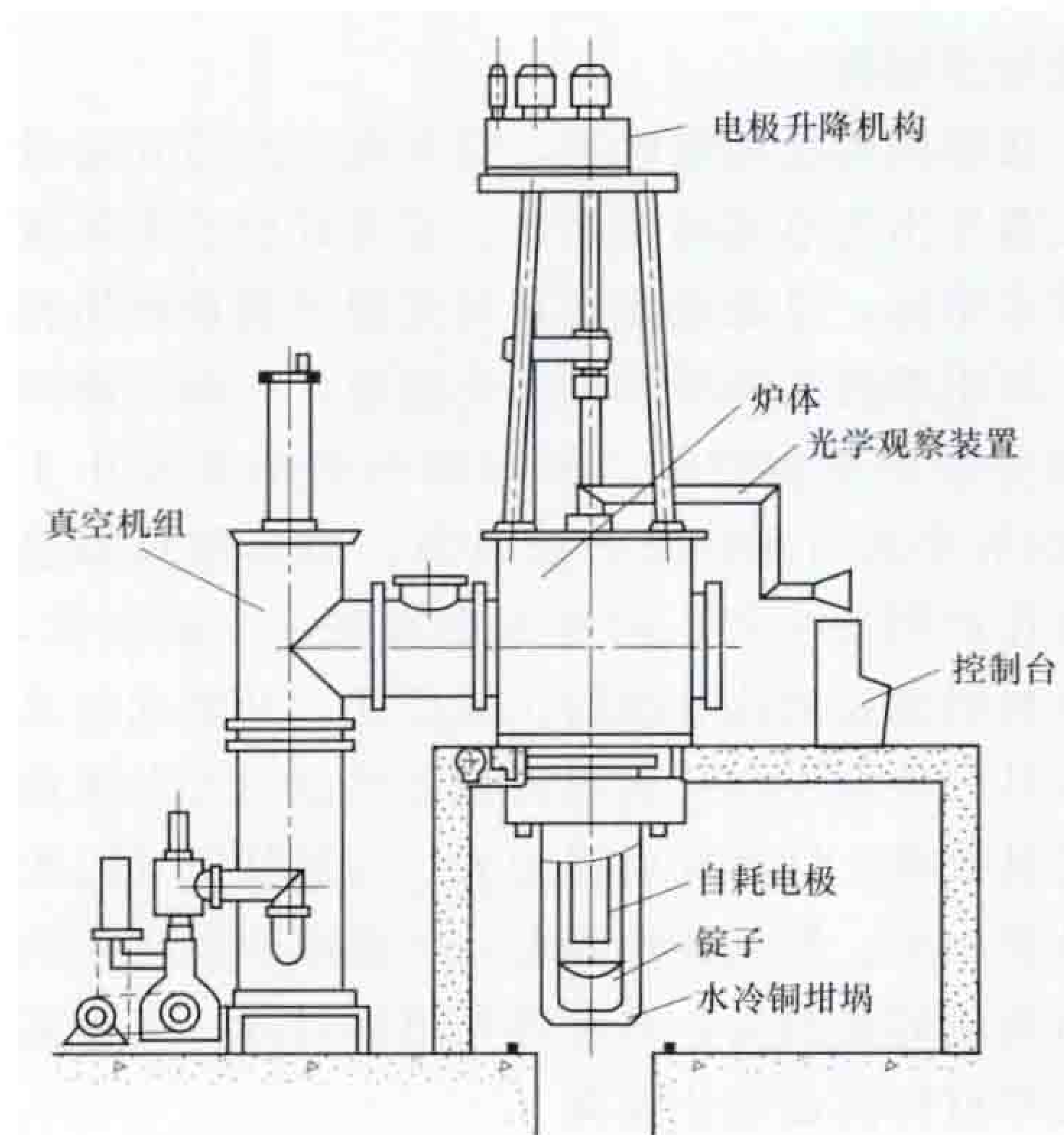
与炼钢电弧炉和埋弧炉等非真空电弧炉比较，真空电弧炉的特点是：①用直流电源供电（电极接负极、坩埚接正极）；②电极和坩埚通常都用金属材料制成，炉内没有耐火材料炉衬；③熔炼中被熔炼金属能免受氧化和耐火材料的污染，并得到良好的脱气效果和促进金属氧化物分解的精炼效果；④由于在密闭容器中熔炼，所以操作环境好，对环境污染小；⑤特别需要注意安全。真空电弧炉工作时，特别当熔炼钛、锆等活泼金属时，如冷却水进入坩埚，会引起爆炸。其防范措施主要有：电极与坩埚壁间的净空距离应大于电弧长度，在坩埚外侧设置直流稳弧线圈，供电电缆作对称布置，电极自动调节器应足够灵敏等，以防止电极与坩埚壁之间产生边弧把坩埚击穿；确保冷却水畅通；设置防护墙，操作人员在墙外观察操纵等。

分类　真空电弧炉按电极类型（见电弧炉电极）主要分自耗炉和非自耗炉两大类。工业上用的主要是自耗炉，也有同时采用自耗电极和非自耗电极的炉型，由自耗电极提供主炉料，由非自耗电极进行辅助加热，浇制铸件的炉子往往采用这样的炉型。

真空自耗电弧炉的电极由被熔炼材料本身制成，叫自耗电极。在熔炼过程中，电极端头逐渐被熔化，滴入水冷铜坩埚中，电极本身不断自耗。真空自耗电弧炉主要用于重熔钛、锆、钼、钽、铌等活泼金属和难熔金属的坯料以制取铸锭，如把海绵钛电极重熔成钛锭；也可用于精炼合金钢和制取大直径优质钢锭，如用于制造发电机轴和轧辊等的锻坯。

真空非自耗电弧炉的电极用钨等高熔点材料制成。工作中电极本身不消耗，炉料需用别的途径加入炉内。这种电弧炉主要用于在真空中浇制上述材料的异型铸件和在实验室中制取试验用坯锭。

设备组成　成套装置由炉体、水冷铜坩埚、真空机组、光学观察装置、控制系统、直流电源等部分组成，如图所示。



真空自耗电弧炉结构简图

炉体由炉壳、上下端盖、电极杆及其升降机构、炉架等组成。电极杆与上端盖间有滑动密封装置，杆的下端接自耗电极、上端连升降机构。炉体下端接坩埚。坩埚通常做成圆筒形，分内外两层，分别用铜和不锈钢制造，中间可通水冷却。熔炼时，金属熔滴滴入坩埚后先形成熔池，然后逐渐冷凝结晶成锭子。因此，这种坩埚又叫水冷铜结晶器。还有一种坩埚呈半球形，有浇注口，可倾倒。熔炼时，其内面会结上一层由被熔金属本身冷凝成的壳体。采用这种坩埚的炉子用来在真空中浇制铸件，又叫凝壳炉或壳式真空电弧熔铸炉。

真空机组通常以罗茨泵或油增压泵为主，配以前级机械泵。从熔炼工艺和安全要求出发，真空机组应能保证炉内工作压力不超过10Pa（通常在0.1～1Pa范围内）。

光学观察装置用来观察炉内的熔炼过程，也有采用工业电视系统的。

控制系统主要是电极调节器，用来控制电弧长度，使电弧功率和熔化过程稳定（见电弧炉电极调节器）。采用计算机过程控制系统，实现集中控制。

直流电源采用晶闸管整流装置，工作电压为20～40V，空载电压约为80V，工作电流每100mm（直径）结晶器为1600～3500A，电流做大范围（约10∶1）调节。电源应具有恒流特性（见弧焊电源），短路电流应不超过额定电流的1.2倍。真空自耗电弧炉的熔化电耗在500～1300kW·h/t范围内。

历史与发展　1903年，英国人W.V.佰顿（W.V.Bolton）首次使用自耗电极在真空充氩气氛下进行了钽的熔炼。第二次世界大战后，由于钛生产的需要，真空电弧炉首先在美国得到工业应用。1949～1953年，美国人杰佰特（Gillbert）成功地进行了海绵锆（Zr）、钛（Ti）的真空电弧熔炼。20世纪50年代中期，由于导弹、重型武器装备生产的需要，真空电弧炉开始用于高级合金钢和高温合金的重熔。1957年，用于特殊钢熔炼的真空电弧炉在美国的Allegheny Ludlum Steel公司和Universal Cyclope公司投入工业运行。同年，联邦德国、日本等国也相继成功地研制出特殊钢熔炼用真空电弧炉，并投入工业运行。80年代初，美国特种金属公司（Special Metals Corp）研制出采用两根水平布置的自耗电极取代传统真空自耗炉中单根垂直悬挂的自耗电极，靠两根电极极间的电弧来熔化金属的真空电弧双电极重熔炉。此炉的主要优点是：可生产超细晶粒的高温合金钢锭；电耗低。1989年，能够生产ϕ 300mm、重2t锭子的真空电弧双电极重熔炉在美国投入工业运行。20世纪末，世界上容量最大的真空电弧炉是美国Midvale-Heppenstall公司于1961年设计、1962年实施技术改造的52t特殊钢熔炼用真空电弧炉，可以用于ϕ1520mm钢锭的重熔。

中国于20世纪60年代开始研究、制造真空电弧炉。60年代中期，长春电炉厂与西安电炉研究所合作制造了3000kg真空自耗炉。中国生产并投入使用的真空电弧炉主要有250，1000，3000kg等规格。中国还拥有可熔铸重15t钛锭的真空自耗电弧炉和铸件重达1t的凝壳式真空电弧熔铸炉等。

20世纪90年代以来，由于钢包精炼炉和电渣重熔炉等的迅猛发展，真空电弧炉在炼钢方面的应用日趋减少。

zhenkong dianzulu

真空电阻炉

（vacuum resistance furnace）　装料炉膛空间内工作压力低于10^5Pa的电阻炉。真空电阻炉是真空技术与电阻加热炉相结合的产品，它具有密闭的真空腔，工作时真空机组把真空腔内的空气抽出，使炉料得以在真空下加热。真空是压力低于一个大气压（10^5Pa）的气体状态，气体稀薄的程度称为真空度。真空度越高，则气体的压力越低，气体含量越少，或单位容积内气体分子的数目越少。真空区域的划分及相应的真空获得设备和真空测量仪表见表1。

表1　真空区域的划分及相应的真空获得设备和真空测量仪表

真空区域	低真空	中真空	高真空	超高真空
压力范围（Pa）	10^5～10^2	10^2～10^{-1}	10^{-1}～10^{-5}	<10^{-5}
真空获得设备	机械真空泵、各种低真空泵	机械真空泵、油或机械增压泵、油蒸气喷射泵	扩散泵或分子泵	离子泵、分子泵、扩散泵加冷阱、吸附泵等
真空测量仪表	U型管和弹簧压力表	压缩式真空计，热传导真空计等	冷、热阴极电离真空计	改进型热阴极电离真空计、磁控真空计

用真空电阻炉加热和处理炉料具有以下优点：①防止氧化。真空炉中氧的分压很低，炉料在真空炉内加热可避免氧化和脱碳，并能除去金属表面的污垢。任何金属及其合金，包括钛及其合金在真空下加热均能达到光亮处理的目的。②变形小。真空下加热属于完全辐射加热方式，基本上没有对流和传导传热的存在，因此其加热速度比其他加热方法缓慢，加热时的热应力也小，而且机加工时的残余应力可在缓慢的加热中自行消失，故变形小。③安全、无公害，作业环

境优越。工业上使用的真空电阻炉多为圆筒型双层水冷炉壳结构，作业时炉子外壳的温度接近室温，炉内气氛多为氮气、氩气等惰性气氛，且不使用氰化物、氨分解气体等有害物质，故无爆炸、火灾等危险。④脱气作用。固态金属零部件在真空下加热和真空熔炼难熔、活泼金属等一样可达到充分去除 H_2、N_2、O_2的目的，表层效果特别明显。脱气后可提高钢的塑性和强度，提高钢材表层的力学性能和外观品质。⑤脱脂作用。金属表面，特别是机加工后的工件表面，虽经过一定的清洗，但仍附着少量的润滑脂、清洗液、氧化物的残渍。在真空下加热，这些残渍很容易挥发或分解，随即被真空泵抽走，达到金属（工件）表面净化、光亮的目的。⑥某些材料如活泼金属，只能在真空电阻炉中加热处理。⑦可达到一般电阻炉达不到的高温。

真空电阻炉同一般电阻炉相比较，结构较复杂、设备投资大、操作维护水平高、运行成本较高。而且随着真空度等级的提高，其结构复杂程度以及其他相关费用均随之明显增加。因此，正确选择真空度等级至关重要。

基本结构 主要由炉体、真空机组、电源和控制系统等组成。炉体主要由炉壳、*加热元件*、隔热屏和炉床等组成。结构上有卧式和立式两种，根据炉室多少又有单室、双室、多室之分。单室炉用于间歇作业；双室或多室炉则可在不破坏加热室真空的情况下进料或出料，生产效率较高。

分类 真空电阻炉的种类及其分类方法很多，用得较多的是按结构和加热方式分类和按用途分类。

按结构和加热方式分类 可分为外热式和内热式两大类，其特点和用途见表 2。

表 2 外热式和内热式真空电阻炉特点和用途

分类		特点	主要用途
外热式（又称热壁式）		①真空腔容积较小，较易抽真空；②炉衬和加热元件与普通电阻炉相同，材料费用低，结构较简单；③受炉罐材料热强度的限制，工件温度一般在1100℃以下	适用于炉温低、真空度要求不高的场合，如真空除气、真空回火、铜及合金的退火、真空炭化、气相沉积等
内热式（又称冷壁式）	自冷式	①加热、冷却的速度比外热式的快，气冷和油冷的冷却速度尤其快；②可以制造成大型炉或高温炉；③加热元件和隔热屏在真空中工作，其所用材料均为特殊的，而且结构复杂，材料费用较高，炉子的造价要贵很多；④一般真空度较高，多采用两级或三级泵，较外热式炉抽空困难些	难熔金属、活泼金属、磁性材料的退火，不锈钢的钎焊，真空除气，某些材料的真空烧结等
	气冷式		高速钢、模具钢、马氏体不锈钢等气冷淬火，钢的淬火处理等
	油冷式		低合金钢、合金工具钢、轴承钢等和油冷淬火钢的淬火处理、真空渗碳等

外热式真空电阻炉也常称简易式或预抽真空炉。井式、钟罩式等形式是其最常见炉型，典型的井式炉结构示意如图 1 所示。

内热式真空电阻炉（见图 2）可分为自冷、气冷、油冷等多种形式，以满足不同热处理工艺对加热工件冷却速度的要求。图 3 所示为气冷式炉体基本结构。

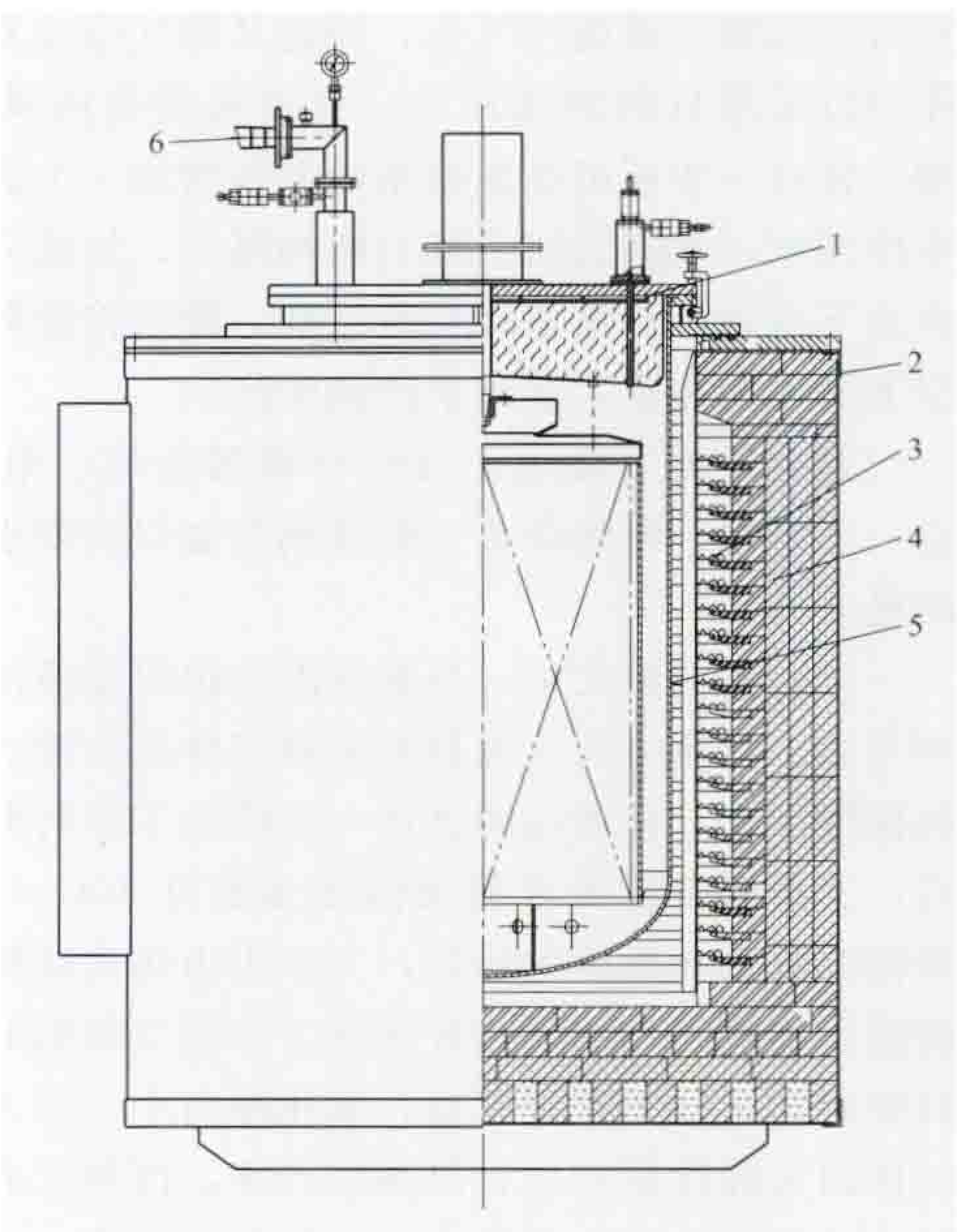
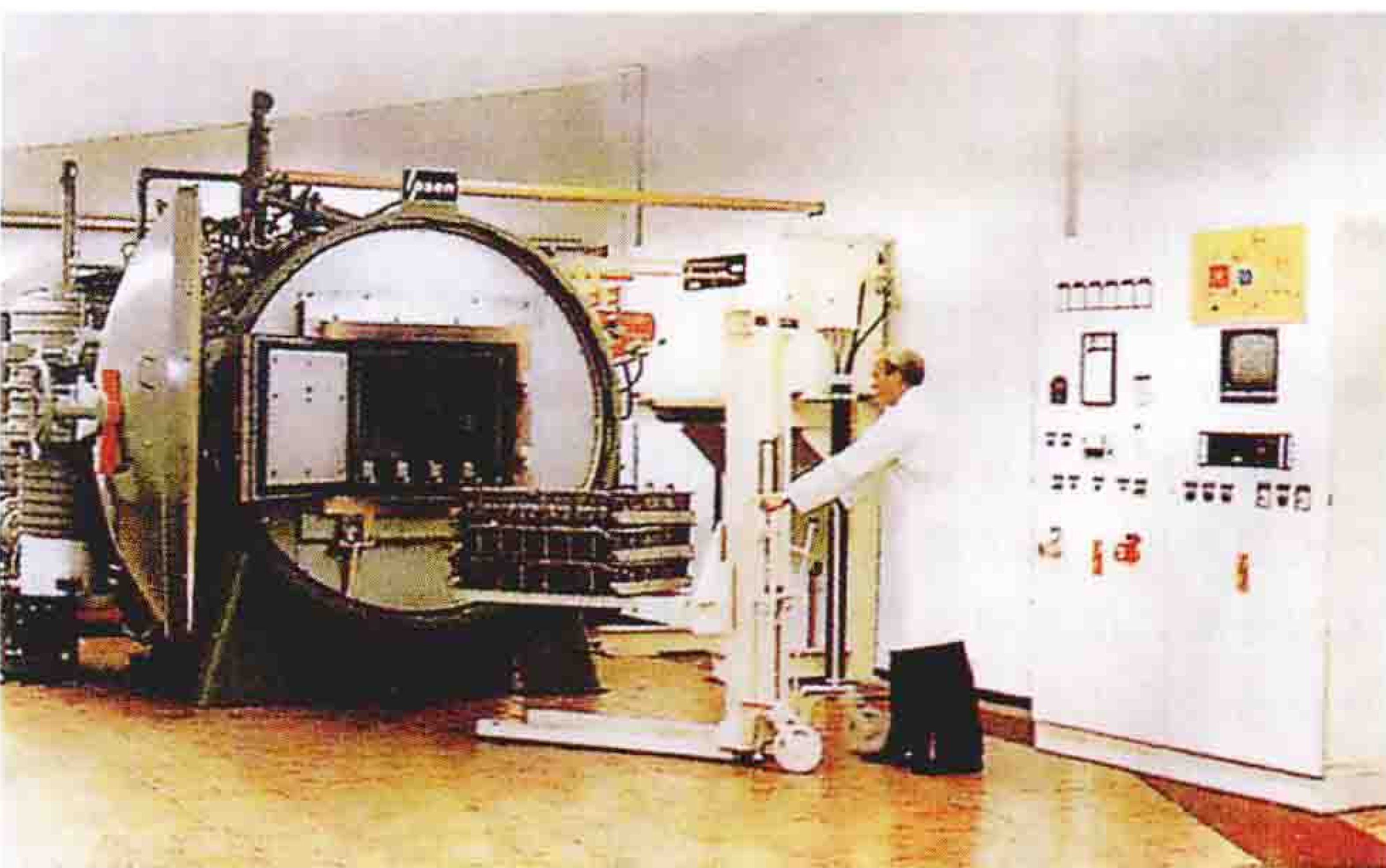


图 1 典型的井式炉结构示意图

1—炉盖；2—炉壳；3—炉衬；4—加热元件；5—炉罐；6—抽真空接口

按用途分类 可分为真空退火炉、真空回火炉、真空淬火炉、真空化学热处理炉、真空钎焊炉、真空烧结炉等。

（1）真空退火炉。工件在炉内真空状态下加热后随炉子自然缓慢冷却完成退火，也称单室自冷式真空炉，是结构最简单的一种。


图 2 内热式真空电阻炉（胡叔良 提供）

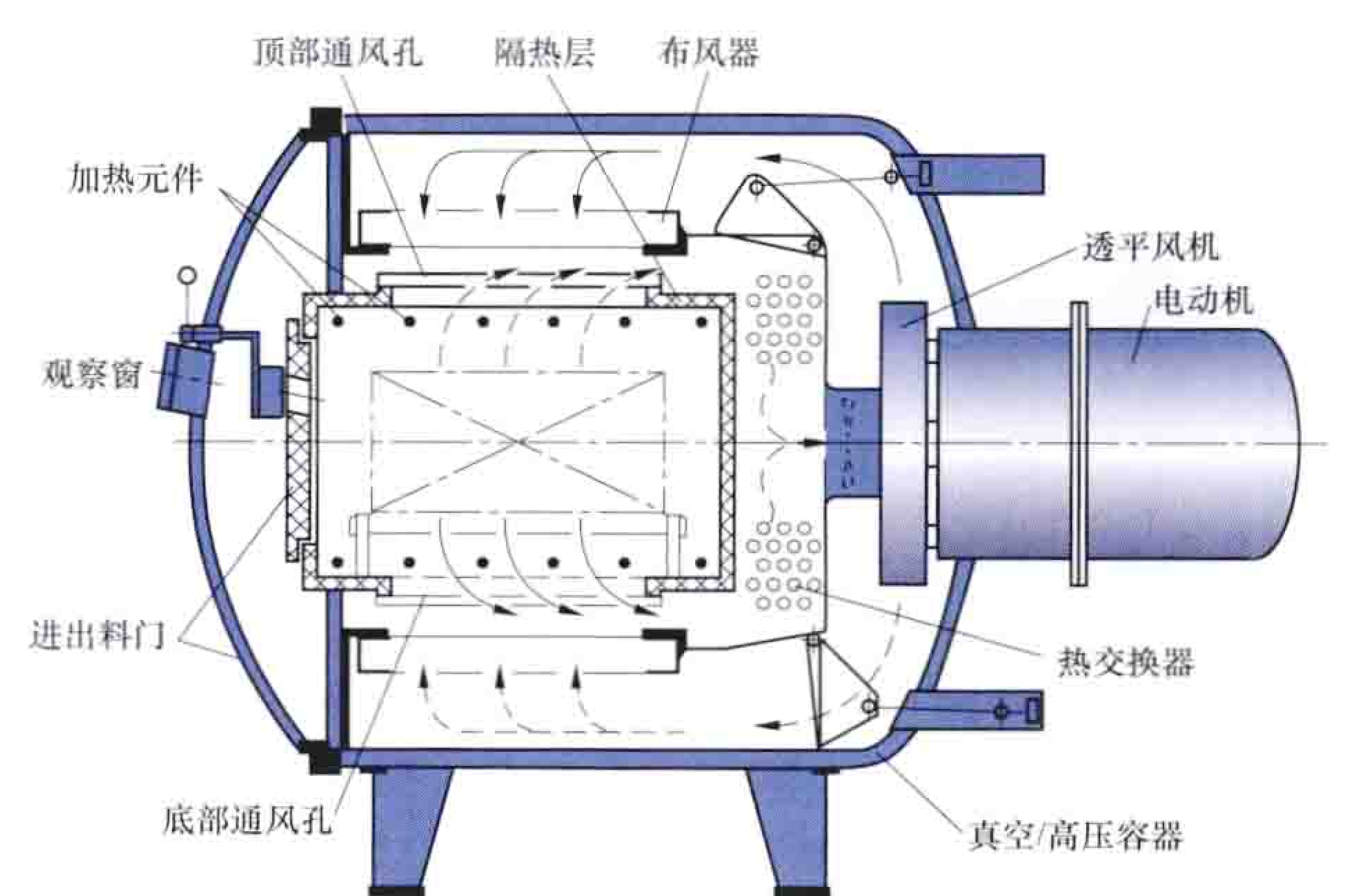


图 3 气冷式炉体基本结构（胡叔良 提供）

由于真空炉内的传导传热和对流传热都非常弱，冷却速度较慢、时间长、生产率低。为了增大冷却速度，提高生产率，真空退火炉可以增设充气设备。在对工件冷却时向炉内

充入高纯氮气或惰性气体，因此又称气冷式真空退火炉，气体可以采用自然对流冷却，也可采用炉内风机强迫循环冷却；再进一步还可在加热室两端各增加一个真空进料室和真空冷却室，各室之间用真空闸阀隔开，加热完成后的工件在真空下进入冷却室进行快速冷却，随后将进料室的工件在真空下送入加热室，实现半连续生产。

真空退火主要用于活性与难熔金属、电工钢及电磁合金、不锈钢、耐热合金、铜及铜合金以及要求高的钢铁材料的退火与脱气。

(2) 真空回火炉。与真空淬火炉配套使用的炉子。真空淬火后进行真空回火的目的是将工件真空淬火获得的优良特性保持下来，并通过回火进一步改善工件材料的性能。其特点：①根据工艺要求使用温度多数在100～800℃，为了确保传热效率和温度的均匀，大多为内热式结构。②由于温度较低，加热元件和隔热屏采用工作温度较低的、价格便宜的材料制作。③工作温度低，氧化倾向小。④为了减少或防止工件回火脆性的产生，提高生产率，内热式真空回火炉冷却时均采用惰性气体循环冷却。气体循环有内循环、外循环两种方式。

(3) 真空淬火炉。将工件在真空炉内加热至固态相变点以上，然后在真空下进行快速冷却，以越过缓慢冷却下的平衡相变组织，获得更低温度下的另一种非平衡相变组织，改变和提高工件性能。该炉是真空电阻炉中结构较复杂的炉子，其加热温度为800～1300℃，真空度为$10\sim10^{-2}$Pa，油淬火介质为专用真空淬火油。真空淬火后的工件表面状态好，工件的尺寸和形状变形小。

真空淬火炉结构分单室、双室、三室几种形式。单室真空淬火炉又可分为单区式和双区式两种形式，图4所示为带冷却区域的单室真空淬火炉结构示意图。与单区式单室真空淬火炉相比，双区式单室真空淬火炉的加热区虽与冷却淬火区相分离，但其间无真空闸阀相隔，仍在同一室内和相同的真空条件下工作，故仍称单室真空淬火炉。双区式单室真空淬火炉的冷却速率、生产率高于单区式单室真空淬火炉。冷却区若采用气淬，则设置充气设备、冷却气体循环风机、工件转移机构等；若采用油淬火，则在冷却区下方设置淬火油槽，油槽内安装有料台升降机构、油搅拌器和保持油温用热交换器等。

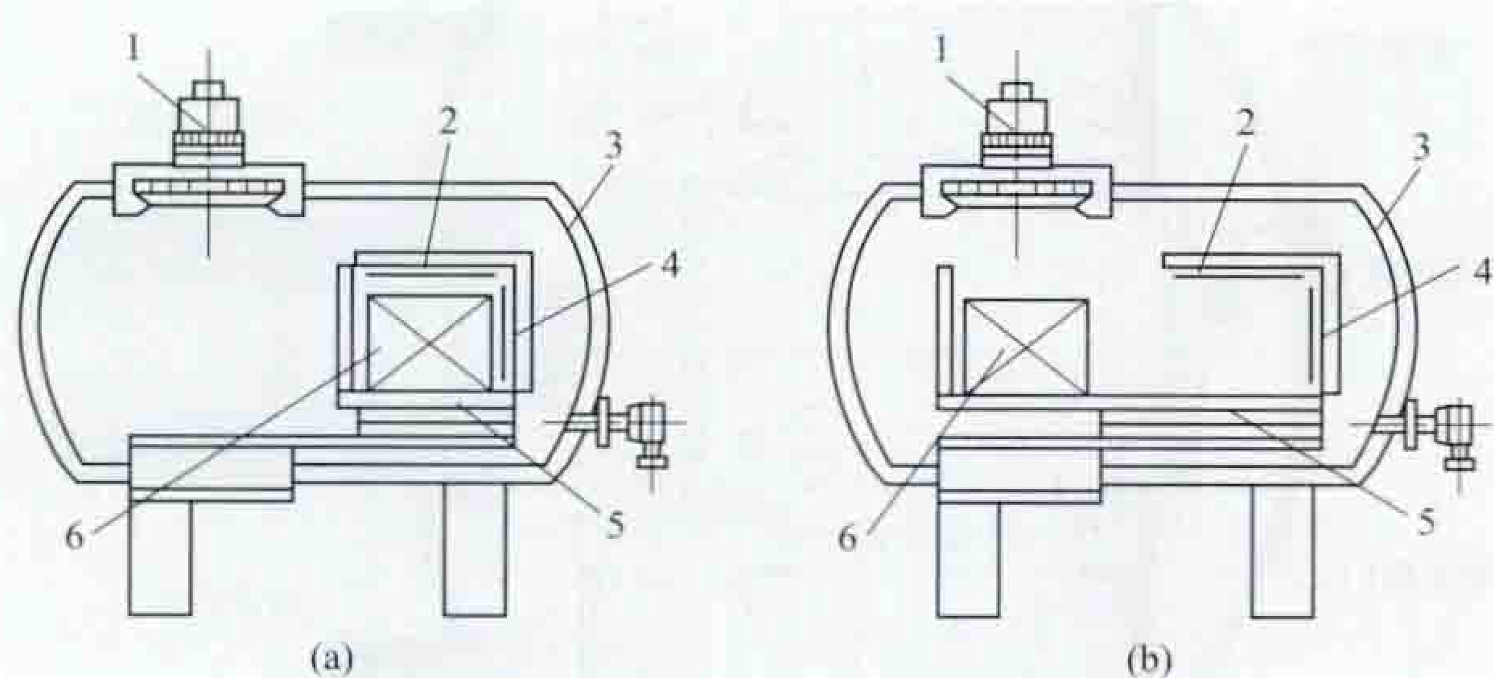


图4 带冷却区域的单室真空淬火炉结构示意图
(a) 加热状态；(b) 冷却状态
1—冷却风机；2—加热元件；3—炉壳；4—隔热屏；5—转移机构；6—工件

单室真空淬火炉的优点是结构简单、操作维修方便、造价低廉。缺点是加热、冷却同在一个室内，抽真空、升温时间长，生产率低；采用惰性气体淬火时，加热区也随之快速冷却，造成急冷急热；采用油淬火时，产生的油蒸气污染加热区，因而影响加热元件、隔热屏等的使用性能和寿命，应用面受到限制。

双室真空淬火炉是真空淬火炉中应用最多的炉型，典型的卧式双室真空淬火炉结构示意见图5。这种炉子将加热和冷却分为两个室，中间由真空闸阀隔开。冷却室由充气装置、冷却气体搅拌风机、淬火油槽、热交换装置、工件转移与升降装置等组成。真空系统可以对加热室和冷却室分别切换抽真空。由于加热室和冷却室之间有真空闸阀将两室隔开，工件在冷却室进行冷却时，加热室仍可保持真空和高温状态。采用气淬时，工件的冷却速率较单室真空气淬炉快。工件装炉后只需对冷却室抽真空，因而可缩短抽真空和加热时间，提高了生产率。其结构较简单、操作方便、占地面积小、灵活多样，适合于多品种、中小批量生产。

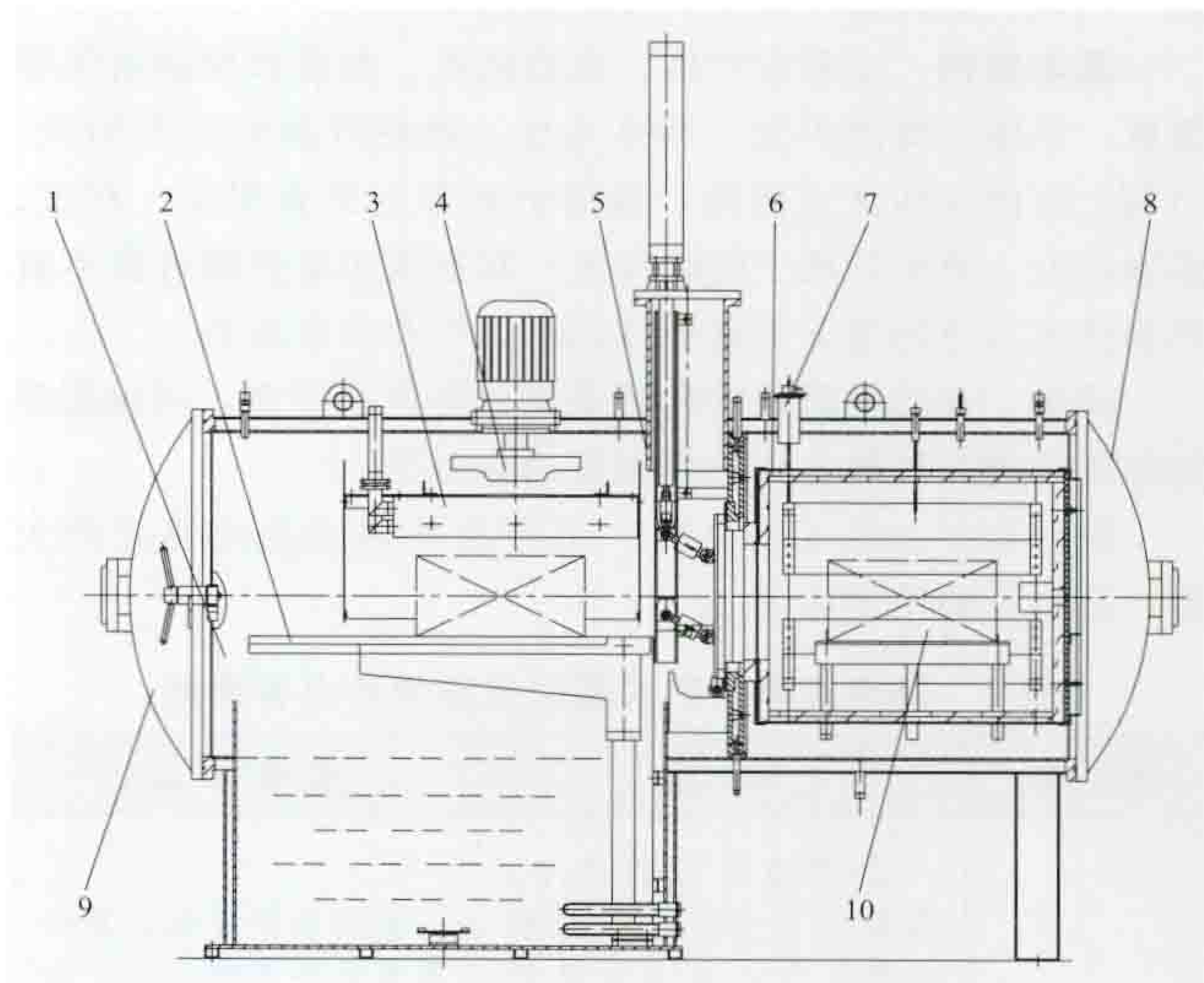


图5 卧式双室真空淬火炉结构示意图
1—炉体；2—工件传送装置；3—换热装置；4—气冷装置；5—真空隔热门；6—加热室；7—水冷电极；8—前炉门；9—后炉门；10—工件

三室真空淬火炉由进料室、加热室和冷却室三个室组成，相邻两室间由真空闸阀隔开。工艺流程为：工件先进入进料室，然后进入加热室加热，再进入冷却室进行气淬或油淬处理，最后从冷却室出炉实现半连续或连续式的真空淬火处理。该炉适用于大批量连续生产，具有生产率高、节能、成本低的特点，但结构复杂、设备投资大、控制系统要求高。

真空淬火炉中值得特别提及的是20世纪90年代后期发展很快的高压气体淬火炉，简称高压气淬真空炉，是为提高气体真空淬火炉的冷却速率，实现对高速钢、模具钢工件完全淬火而研制的一种真空淬火炉。其充气压力一般在0.25MPa以内，而高压气淬真空炉的充气压力一般在0.5MPa乃至几兆帕。20世纪90年代末，2～4MPa的高压气淬真空炉已获开发并投入工业运行。高压气淬真空炉常用的冷却气体有氢、氮、氩、氦等气体。若以氮气的冷却速率设定为1，则上述各气体的冷却能力分别为2.2，1.0，0.7，

1.7，氢气的冷却效果最佳。工业上大多使用氮气作高压气淬真空炉的淬火介质，因氮气是中性气氛，安全性高且价格低廉。

(4) 真空化学热处理炉。真空条件下对工件进行加热、化学处理的一种真空电阻炉，使用较多的是真空渗碳炉等。

真空渗碳炉是在真空气氛下对工件进行加热、渗碳处理的一种真空化学热处理炉。真空渗碳后一般多进行真空淬火，因此真空渗碳炉的主体结构与真空淬火炉相同，不同之处是渗碳加热室内增设有搅拌风机，以确保渗碳气体的良好循环与均匀渗碳。

渗碳气源主要利用高纯度（≥99%）的甲烷（CH_4）、丙烷（C_3H_8）或不饱和乙炔（C_2H_2）在炉内高温下的分解反应提供渗碳的碳原子，辅助用气为高纯度（≥99.9%）氮气。渗碳气体充入炉内的方式根据工艺要求分为一段式、脉冲式和摆动式3种。炉内渗碳气体的压力一般控制在0.1～3kPa，常用渗碳温度为900～980℃，高温渗碳为1040℃。

真空渗碳的特点是：工件在真空下加热有防止表面氧化、净化表面的作用，故表面处理质量高且无晶界氧化现象；加热均匀、渗层（厚度）均匀；渗碳温度与渗碳气体浓度高，渗碳速度快。

真空渗碳炉多为间歇作业式炉，并配置有油冷却淬火机构。真空渗碳适合于大型机械零部件的渗碳处理，主要用于各种齿轮、模具钢、工具钢表面脱碳层的覆碳，以及不锈钢的渗碳和高模数齿轮的深层渗碳处理等。

(5) 真空钎焊炉。在真空加热状态下，熔点比基体金属低的钎料在熔化成液态后，靠工件间微小间隙的毛细管吸力作用及表面吸附、润湿作用填充基体金属间隙而形成牢固结合的钎焊设备，见图6。真空钎焊炉和真空退火炉在结构上类似，分为单室和多室的。单室的有立式上装料、下装料结构（见图7）。



图6　大型真空铝钎焊炉

真空钎焊炉的结构形式多种多样，钎焊完成后需要真空淬火的，采用真空淬火炉的结构形式。如果基体材料和钎料在焊接时挥发极少，则可直接使用温度及真空度适当的真空退火炉或真空淬火炉来进行真空钎焊。

真空钎焊时基体材料或钎料中会有较多挥发物，如真空铝钎焊，钎料中挥发出较多的镁蒸气；真空铜钎焊，有铜的蒸气挥发。这些挥发物附着在加热元件和电极上，会引起电热元件的失效或短路。另外，其挥发物进入真空系统中，将使真空机组污染。因此，用于此类材料的真空钎焊炉，应采取特殊措施：①将加热元件与挥发物隔离，使加热元件的绝缘不易受污染；②加热元件易于清理或更换；③真空系统中，在其进气端增设挥发物的捕集器。

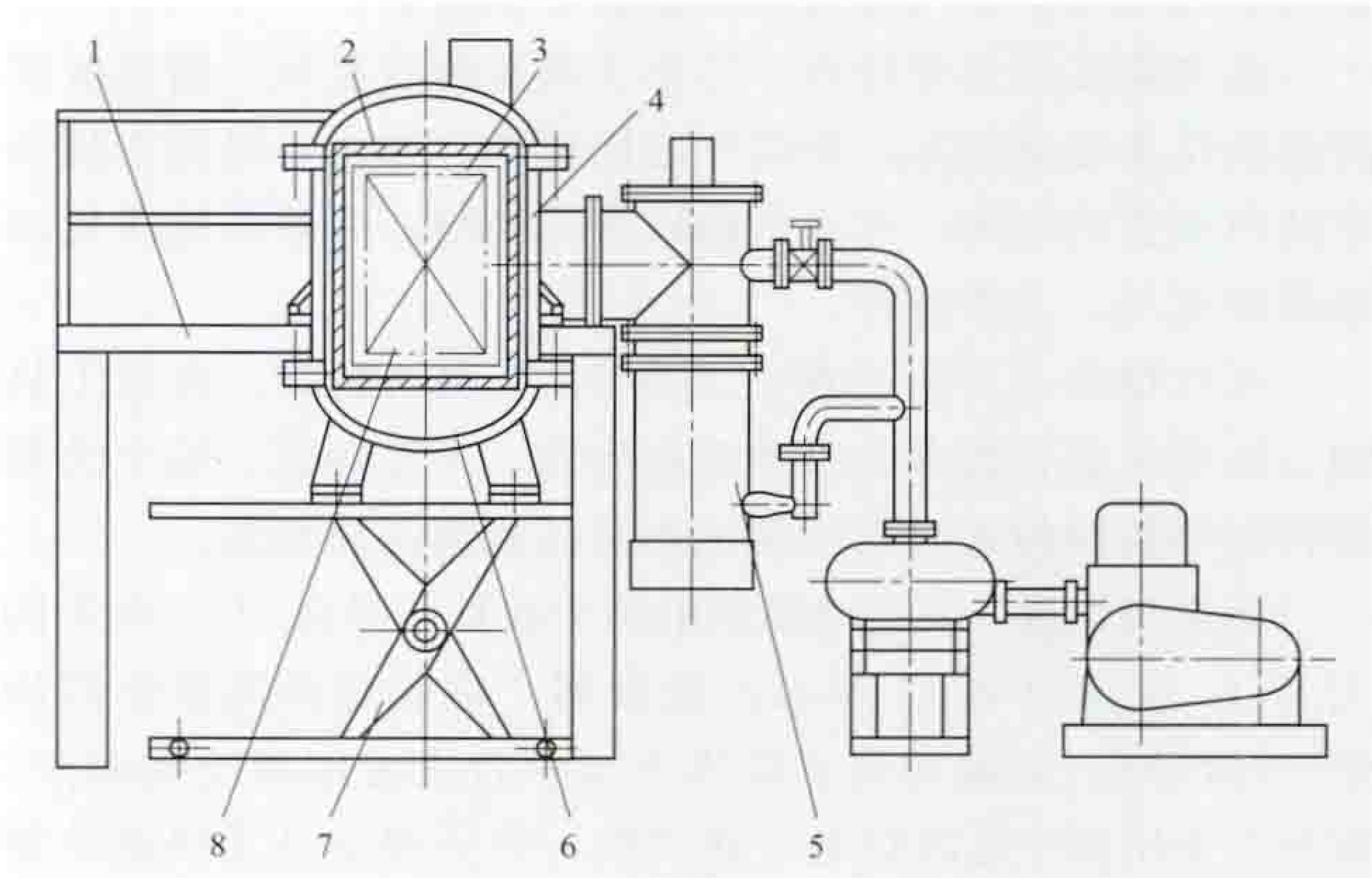


图7　下装料真空钎焊炉示意图

1—操作平台；2—隔热屏；3—加热元件；4—炉壳；5—真空机组；6—下盖；7—升降机构；8—工件

真空钎焊的优点是：①焊口洁净，焊接仅用钎料，无需辅助钎剂，焊接接头的致密性好、强度高，可获得良好的焊接质量；②焊后工件表面清洁光亮；③可以钎焊其他方法难以钎焊的金属、合金以及某些高温金属。缺点是：①不宜钎焊含蒸气压高的、含易挥发元素较多的金属和合金；②投资大，结构复杂；③运行费用较高，操作水平要求高。

真空钎焊广泛用于航空、航天、电子、原子能及汽车制造和制氧机等工业应用领域。

(6) 真空烧结炉。将金属、合金或非金属材料制成的细小颗粒粉末材料按一定的比例混合并压制成型，在真空下加热，使粉末颗粒间互融或互渗结合，形成具有一定组织结构和特性的烧结制品的工艺设备。真空烧结炉的加热方式多采用电阻加热。真空烧结主要分脱蜡（预烧结）、烧结和强制冷却等几个工艺阶段。该炉可分为单室炉和连续式炉两种形式。单室型真空烧结炉，脱蜡、烧结在同一室内进行，适合于多品种、小批量的烧结生产。多室型连续式真空烧结炉，脱蜡、烧结、冷却均在各自专用室内进行，具有生产效率高、适合于批量生产的特点。多室型连续式真空烧结炉结构示意图见图8。

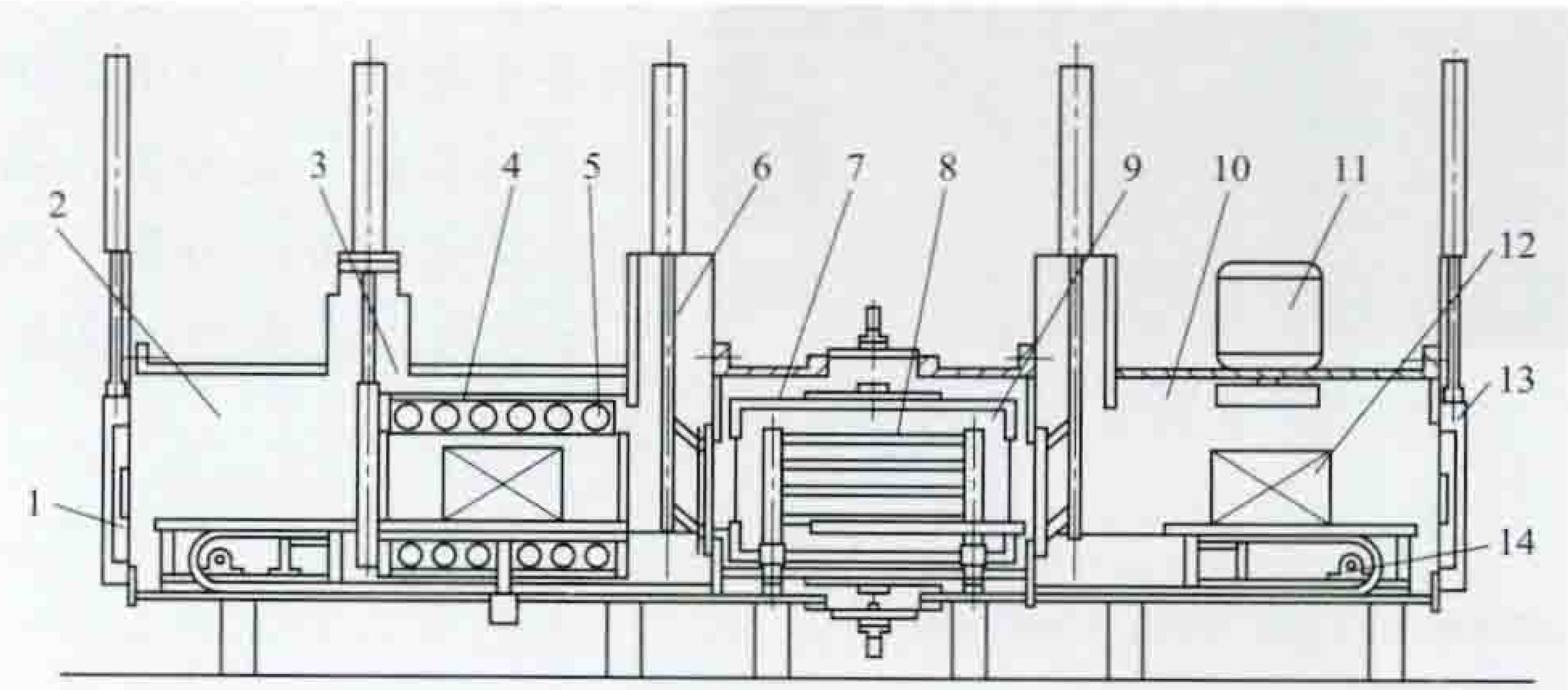


图8　多室型连续式真空烧结炉结构示意图

1—前炉门；2—装料室；3—脱蜡室；4、7—隔热屏；5、8—加热元件；6—真空闸阀；9—烧结室；10—冷却室；11—冷却风机；12—工件；13—后炉门；14—传送机构

真空烧结炉的工作温度较高，一般为1300～2200℃，加热元件多使用钼材或石墨制品，隔热屏多采用钼片、钽片、碳毡或石墨毡以及石墨板等制作，脱蜡室内配置有蜡蒸气捕集器，可进行完全脱蜡并将蜡蒸气直接排出炉外，以防止蜡蒸气污染炉子内壁对烧结造成不利影响。

真空烧结的主要特点：可用于制造形状复杂、精度要求高的高技术烧结制品；烧结件表面清净、光亮；可除去烧结制品内所含的气体；可进行高致密度烧结，有效地提高烧结制品的电气、力学特性。

真空烧结主要用于铁系、Fe-Ni系和不锈钢、高速工具钢、硬质合金、钛合金以及金属陶瓷、工程陶瓷、烯土类磁性材料等各种粉末材料压制成形制品的高品质烧结。

历史与发展 真空电阻炉的历史较长，早在1906年美国人W. C. 艾森（W. C. Aisen）就发明了电阻加热式真空熔炼炉。1949年，美国开发了世界上第一台工业用真空电阻炉。首台工业用真空电阻炉是外热式炉，炉子很小且无快速冷却功能，仅能用于真空退火、脱气和时效处理等。1958年，美国伊普森公司成功地研制出真空密封电机，利用风机的高速旋转和热交换器的换热使炉内惰性气体强制循环冷却，开发了气体冷却式真空热处理炉，实现了机械零部件的空冷淬火，大大推动了真空电阻炉的发展。1965年，真空热处理使用的真空淬火油获得研发成功，与此同时研制出了配置有淬火油槽的双室型真空淬火炉，实现了厚大工件的油冷淬火。20世纪70年代，石墨材料的成功应用进一步促进了真空电阻炉的发展。1974年，冷却气体压力为170kPa的首台高压气体真空淬火炉问世，处理钢种随之扩大。80年代，随着航空、航天、电子、原子能、汽车工业等的迅速发展，批量生产用多室型连续式真空热处理炉和多室型真空烧结炉相继开发并获得应用。90年代中叶，冷却能力接近盐浴淬火能力的900、2000kPa乃至4000kPa的高压气体真空淬火炉和可进行高致密度烧结、炉内气体压力高达100MPa的高压真空烧结炉相继开发并得到应用，有效地解决了ϕ50mm以上厚大尺寸高速工具钢、模具钢等的完全淬火。20世纪末，真空电阻炉作为先进的热加工设备已进入工业应用的各个领域。真空电阻炉正在向节能、无公害、高度自动化的方向发展。图9所示为立式真空电阻炉外形。

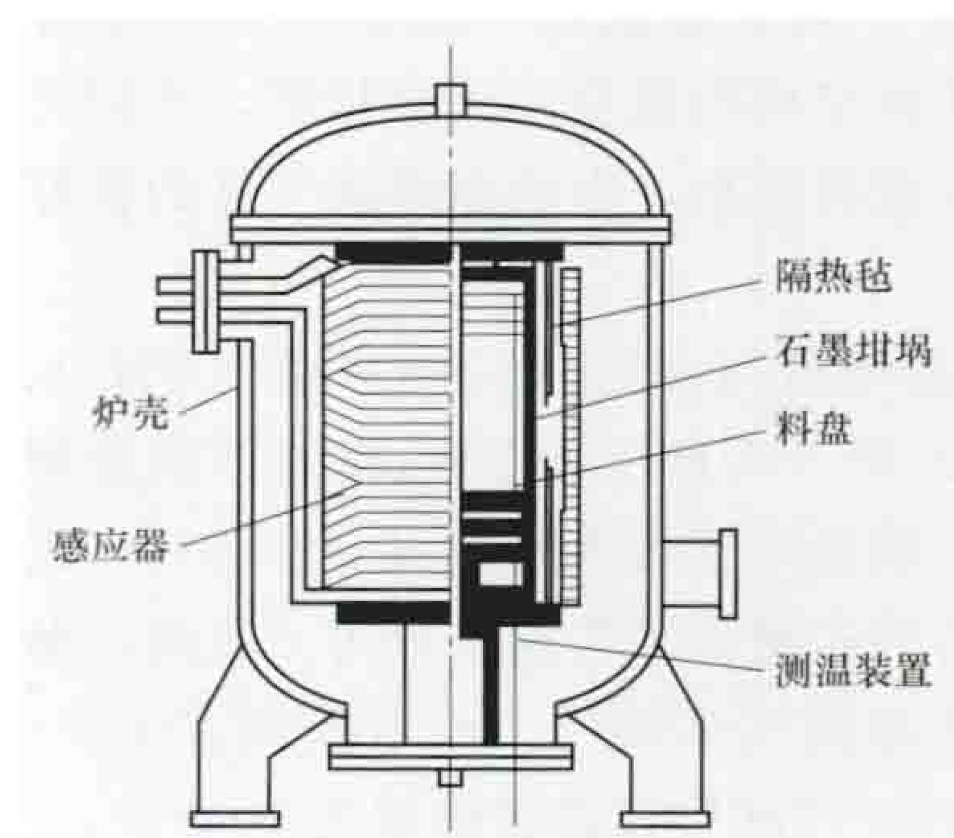

图9 立式真空电阻炉

zhenkong ganying shaojielu

真空感应烧结炉 (vacuum induction sintering furnace)

供粉末冶金件烧结用的真空感应炉。粉末冶金件，即用粉末冶金方法压制成的机械零件、电器零件、磁件、硬质合金件、高温合金件、难熔金属件等的坯件，主要用控制气氛电阻炉和真空电阻炉烧结。但在烧结温度高的场合（1500～2400℃）也用真空感应烧结炉烧结，特别在刃具行业。真空感应烧结炉还应用在碳纤维石墨化，碳-碳复合材料、特种陶瓷（碳化硅、碳化硼、氮化硅等）的真空或控制气氛高温烧结。

真空感应烧结炉的设备组成与坩埚式无心感应熔炼炉类似。炉体一般做成井式或罩式，井式炉结构简单，罩式炉便于装卸工件。炉体由炉壳、感应器、石墨筒、工件托架、供电装置、绝热层、水冷系统、抽气系统等组成，炉壳上设有测温、观察装置等。图中给出一种井式真空感应烧结炉的炉体结构。



井式真空感应烧结炉炉体结构

与多数感应炉不同的是，这种炉子采用间接感应加热，即热能在石墨筒壁中产生，工件所受到的是石墨筒的辐射热。设计中要使石墨筒内部的磁场强度尽可能小，避免工件中产生感应电流，使锐棱、尖角部分过热。采取的措施是采用较高频率（一般不小于8000Hz）的电源，并使石墨筒的壁厚比石墨的电流透入深度大得多。

为减少热损失并使工件加热均匀，可采取以下措施：石墨筒的四周、上下要用绝热材料（如碳毡）很好绝热；感应器的功率分布，中段小，上、下两段大；石墨筒尺寸不能太大，一般为（150～300）mm×（200～500）mm（内径×高）。为避免炉内真空放电，感应器工作电压应限制在200～300V，并采取措施使其在电气上与电网隔离。

zhenkong xichenqi

真空吸尘器 (vacuum cleaner)

利用电动机驱动风机产生负压进行除尘的清洁器具，简称吸尘器（见家用电器）。吸尘器工作时不会使灰尘飞扬，并能吸除地板缝隙中及地毯上一般不易清除的灰尘、纤维、线头等污物，使用方便、卫生，广泛用于家庭和公共场所。

分类 按吸尘器的装配和外形分为立式、卧式和便携式三大类。便携式吸尘器（见图1）又可分为手持式、肩式、杆式等。欧美地区将卧式吸尘器称为缸式或桶式吸尘器，大型的商用吸尘器多为桶式，在中国已有较广泛的应用。吸尘器按使用功能分为干式、湿式和干湿两用式。后两者能够吸取液体或多水性泡沫污物，其结构比干式复杂些。

结构和工作原理 真空吸尘器的吸尘机理主要由起尘、吸尘、滤尘三步骤组成，一般包括电动机、离心式风机、滤尘器、集尘器、连接管和清洁头附件。一般吸尘器的功率为400～1000W或更高，便携式吸


图1 便携式吸尘器

尘器的功率一般在250W及以下。

电动机高速驱动风机叶轮旋转，使吸尘器中的空气高速排出，而风机前端吸尘部分的空气不断地补充风机中的空气，致使集尘器产生瞬时真空，和外界大气压形成负压差，在此压差的作用下，吸入含尘屑的空气，经滤尘器过滤，到达集尘器，留下灰尘，排出清净的空气。负压差愈大，风量愈大，吸尘能力也愈大。

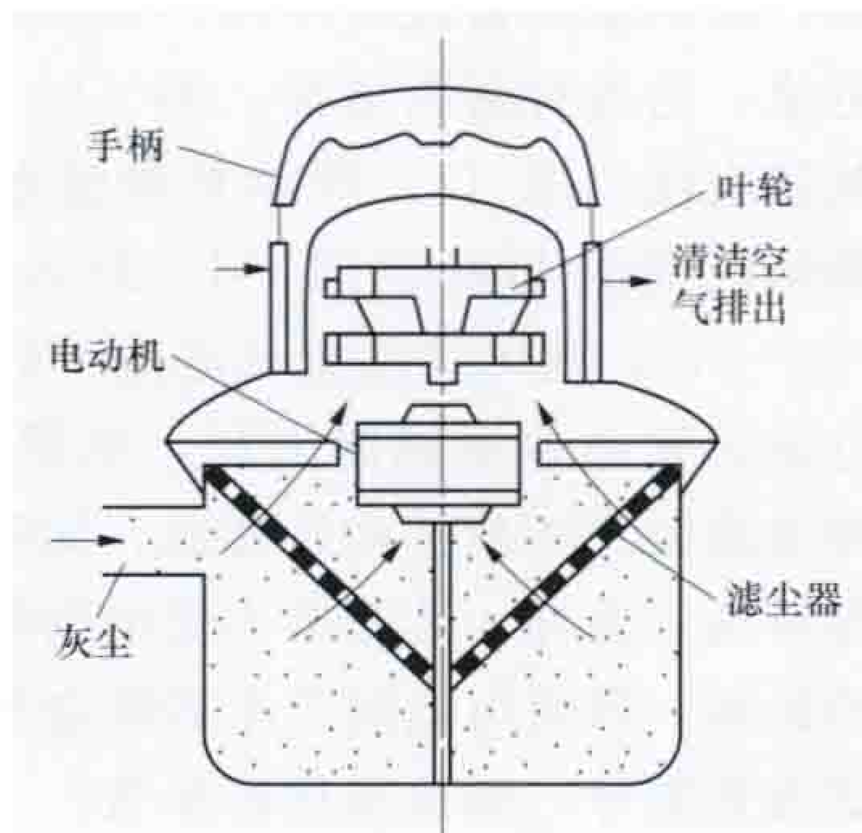


图2 立式吸尘器结构示意图

立式、卧式吸尘器的结构分别见图2和图3。

维护与保养 维护、保养好电动机是延长吸尘器寿命的关键，务必使吸尘器在工作时保持风道、过滤系统通风良好。要求做到：①不要用手去堵住吸尘器的吸入口，吸入口受堵时间过长，对吸尘器最为有害；②切不可在没有装上滤尘器及集尘袋的情况下进行吸尘工作，以免尘埃及脏物进入风机和电动机内；③滤尘器及集尘袋应经常清理干净，防止微孔堵塞、压损增大而影响吸尘效果；④不应吸集潮湿的泥土、泥浆，燃着的烟灰和金属碎屑及尖针等；⑤长期运行后，电动机的电刷将被磨损，如磨损严重，应及时更换电刷。

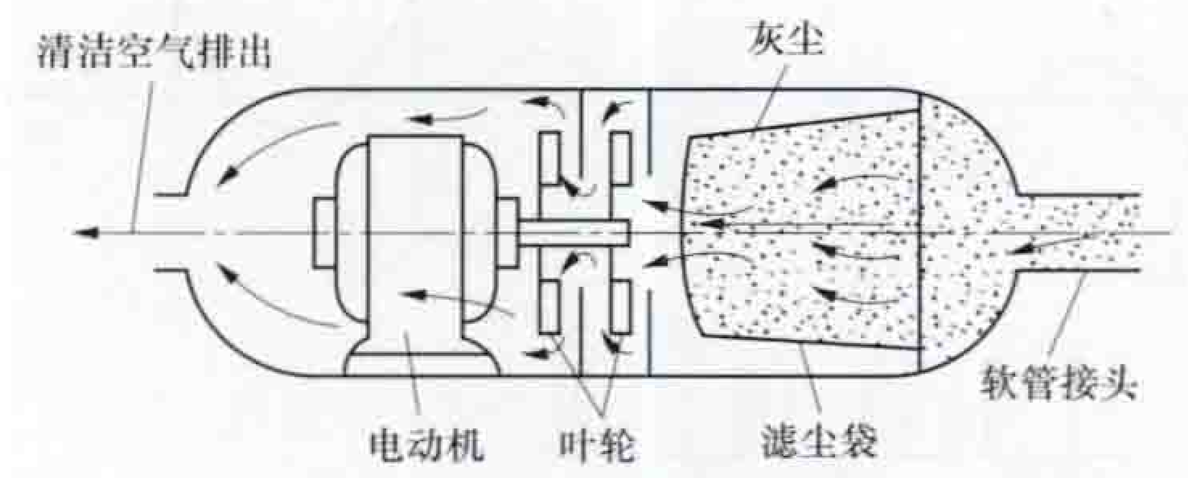


图3 卧式吸尘器结构示意图

沿革与发展 1869年，美国人I.W.麦加夫南（I.W. McGaffney）发明使用人工操作的带有吸附装置的扫除机。1899年，J.苏门（John Thurman）发明了世界上第一台电动吸尘器。1907年，美国人J.M.斯潘格勒（J.M. Spangler）发明带有风机、旋转刷和集尘袋的移动式真空吸尘器，这是现代吸尘器的雏形。中国于1960年在上海研制成功吸尘器并开始批量生产。

吸尘器已经形成庞大的产品系列。除了常见的便携式吸尘器外，中央除尘系统已逐步成熟，它采用内置于墙体内部的集尘管道，通过中央主机产生吸力并利用墙面的集尘孔（配合软管）收集灰尘。

保洁机器人（cleaning robot，又称吸尘机器人、清洁机器人、自动吸尘器，见图4）已广泛应用于现代家庭，它是一种配备了微电脑控制系统的电动吸尘器。其微电脑控制系统能自动识别判断家庭环境，自动计算行走路径，自动避开行走路线上的障碍物，自动清扫地板上的灰尘，自动清理毛发和碎物，清扫任务完成后，自动返回充电，适用于比较干净的家居环境。

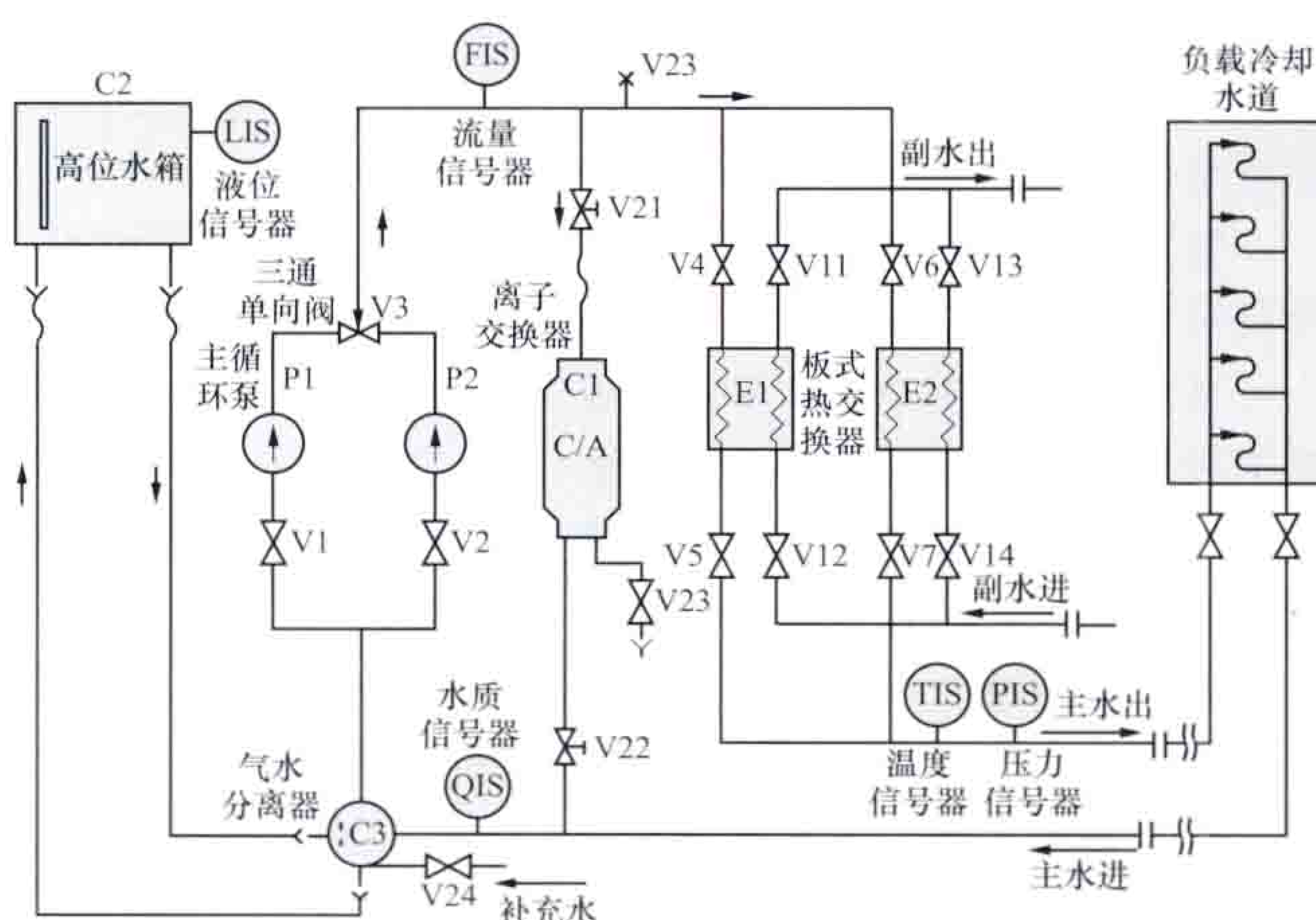

图4 吸尘机器人

zhengliuqi lengqueshui zhuangzhi

整流器冷却水装置 (rectifier's cooling water device)

为整流器提供循环水，以热交换方式将电力半导体器件冷却的设备。由热交换器、离子交换器、泵组、高位膨胀水箱、管道和电控装置等组成。

整流器冷却水装置结构原理如图所示。水-水热交换器为波纹平板式，其一侧流通主水，另一侧流通副水，它可以将在整流器中循环的主水热量以间壁传递方式传递给副水，副水输出到外部水冷却塔降温循环使用。冷却水装置及主水管路均应采用不锈钢材料制成，其电气控制系统具有双机切换功能，水温、水压、水质、水位及流量等数值显示和相应的故障报警功能。



整流器冷却水装置结构原理图

对整流器冷却水装置的水质及冷却系统的要求包括：

（1）对主水水质的要求。根据电解用整流器有关标准要求，大容量整流器一般应采用去离子循环水作为热转移媒介，要求其酸度（pH）值为6～8，硬度（以碳酸钙计）低于0.03mg/L。电阻率按直流电压等级分别为：100～315V时，不小于500Ω·m；315～630V时，不小于1000Ω·m；630～1200V时，不小于10000Ω·m。

（2）在空气湿度较大、冷却水温度较低、与环境的温度差较大时，被冷却的散热导体上往往会出现凝露，破坏电极间的绝缘而引起故障。为此，必须保持主水温度在凝露温度之上。当冷却水有可能冰冻时，应采取内热式加热器或其他防冻措施。

（3）冷却水装置的副水可采用自然流水系统或强迫循环水系统。前者水质、水压和水温都不易控制，水资源浪费极大，应避免使用。对用于整流器冷却的主水系统，应注意保持适度的循环水压，使水路畅通。冷却水装置和整流器带电部位以及带电部位相互之间，应采用绝缘管路，一般要求整流器和水循环系统之间的绝缘管长度不少于1.5m，整流器不同电位点之间的绝缘管长度不少于1m。

（4）水冷系统故障将会使整流器过热损坏，为此需要对整流器进口的水压、水温和冷却母线的温度进行监测和控制，超限时发出声、光信号，并对电路进行控制，减小或切断直流输出电流或分断交流电源。

（5）在整流器使用前和使用一段时间后，应进行水路管道系统的冲洗和除垢工作。

zhengliuqi xiebo

整流器谐波 （rectifier's harmonics） 整流器工作时产生的、引起电力系统电流波形畸变的电流波。整流器（见硅半导体整流器）是电力系统的主要非正弦受电设备，即使电力系统供电电压波形是理想的正弦波，由于整流器件的单向导电作用，在正、反相电压作用下，其电阻值完全不同，因而整流器从电力系统取用的电流也是非正弦的。由于系统参数、整流器相数、接线方式和运行条件的不同，这种非正弦波形都有不同程度的畸变。畸变的电流波形可分解为基波及一系列不同频率和幅值的谐波。

当非正弦电流流经系统中的发电机、输电线路、变压器等元件时，在元件上产生非正弦电压降，使系统中各点的电压波形也发生程度不同的畸变。畸变的电压反过来又对整流器从电力系统中取用的电流波形产生影响，因而谐波电流和谐波电压是伴生且互相作用的。

整流器输出的直流电流和电压也不是理想的直流波形，而是可以分解为直流分量和一系列交流谐波分量的组合波。

整流器的特征谐波和非特征谐波 整流器工作在理想情况下分析所得的 $kp\pm1$（k 为整数 1，2，3，4…；p 为整流电路的相数或每周脉动数）次谐波为整流器的特征谐波，除此之外的各次谐波均为整流器的非特征谐波。

谐波的影响 电力系统中的谐波电流不仅恶化电力系统的电能质量，使整个电力系统经济运行的效益受到一定损失，而且影响用户，干扰通信系统，为此应采用抑制谐波的措施以消除不良影响。

抑制和消除谐波 世界各国都有限制谐波的标准或规定，要求将谐波源注入电力系统的谐波含量控制在允许的范围内。抑制与消除谐波一般有增加整流相数、合理配置系统参数、设置滤波装置等措施。

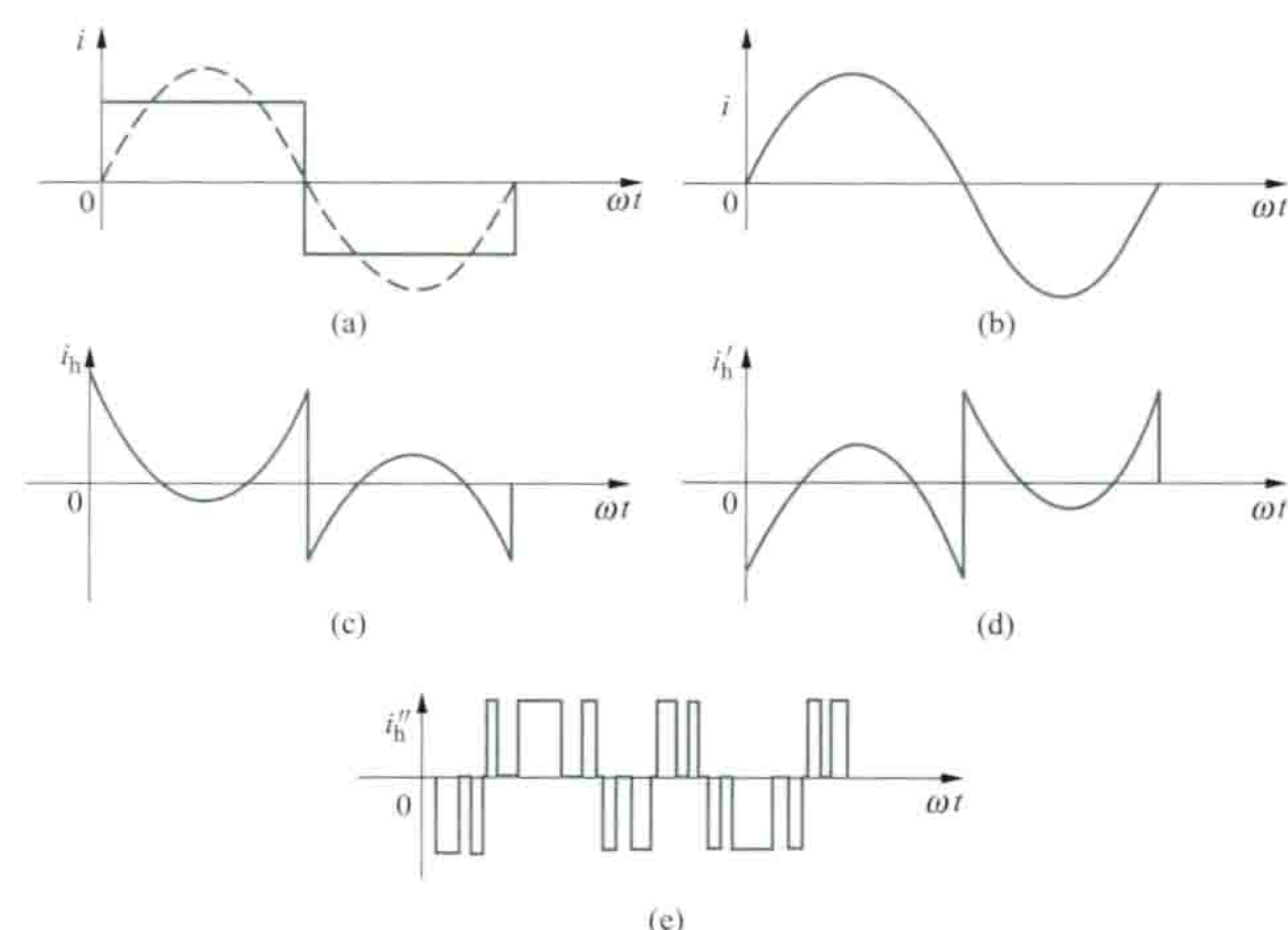
（1）增加整流相数。该措施可以基本消除幅值较大的低次谐波，可采用 12 相、24 相等多相整流系统。这些都是在 6 相的基础上，利用变压器的三相绕组，组成星形或三角形的不同组合，或采用移相绕组构成。但并非相数越多越好，还需综合考虑，当整流相数大于 36 相时，对减少谐波已无明显效果，不宜使用。

（2）合理配置系统参数。增加系统短路容量对抑制谐波影响是有效的，然而往往难以实现，因而需要根据电力系统情况，规定整流器的投入容量。考虑的原则是：①与系统（短路）容量之间的比例；②允许的电压波形畸变等。配置并联电容器时要注意防止对谐波电流的放大作用。可控整流器会出现低次的非特征谐波，为了避免谐振，必须使系统在最低次谐波条件下仍呈感性阻抗。

（3）设置滤波装置。滤波装置可分为无源滤波装置和有源滤波装置两大类。

无源滤波装置是一种用电阻器、电抗器和电容器组成的滤波器，用来抑制进入公用电网的谐波电流。常采用与电力系统并联的固定式单谐振滤波器，设定的串联谐振频率就是需要滤除的 n 次谐波，这样可形成低阻抗通道，起到抑制谐波电流放大的作用。根据需要还可设置不同次数谐波的滤波装置，也可以设计成兼作无功功率补偿的滤波装置。无源滤波装置费用低、可靠性好，但其滤波特性依赖于电源阻抗，并且不能把谐波完全滤掉，特别是对于非特征谐波。同时，滤波装置参数漂移或谐波源谐波的频率变化较大时，滤波装置与电网间有产生并联谐振的危险。

有源滤波装置又称有源谐波抑制装置，实际上就是另造一个谐波电流源，这个谐波电流源产生的谐波电流与用电设备所产生的谐波电流大小相等、方向相反，将其注入电力系统，起到抵消谐波的作用。如图所示，图（a）所示为负荷电流，它含有高次谐波；图（b）所示是希望提供给负荷的基波电流；图（c）所示是谐波电流（i_h）的综合波形。有源滤波装置如能按图（d）所示的电流注入电力系统，使 $i'_h=-i_h$，则可消除负荷电流中的高次谐波分量。利用直流电流的脉冲宽度调制方法，见图（e），可产生 i''_h 波形。有源滤波装置实现了动态滤波，同时，也可对无功功率进行动态补偿，另外，其基本不受电网阻抗和频率等电网参数变化的影响，因而与电网产生并联谐振的风险小。有源滤波装置滤波效果好，但价格比较昂贵。



高次谐波电流抑制原理

（a）负荷电流；（b）基波电流；（c）i_h 波形；（d）i'_h 波形；（e）i''_h 波形

zhijie dianzu jiare zhuangzhi

直接电阻加热装置 （direct resistance heating installation） 对物料直接通电进行电阻加热的电热装置。在这类电热装置中，电流直接流过被加热物料并产生电阻热使其加热。

直接电阻加热装置的特点：①没有加热元件，加热温度不受加热元件使用温度的限制，可用在加热温度高的场合；②由于物料本身直接通电加热，所以加热速度可以很快；③温度精确控制较困难；④为保证加热均匀，对炉料的材质、形状、尺寸有严格限制，适用面窄；⑤一般采用低电压大电流多级调压供电。

直接电阻加热装置主要有石墨化电炉、碳化硅电炉、玻璃窑炉、垂直烧结炉、电接触加热器、电渣重熔炉和电解液加热装置等。

石墨化电炉 用于碳素材料高温加热使之石墨化的电阻炉。工业上用的石墨化电炉如图 1 所示。炉体呈长方体，前后两端墙安装有连接电炉变压器用的石墨电极，炉长约10～25m，宽 1.5～3m，碳素坯料装入量为 20～70t，侧墙有固定式和移动式两种，坯料均匀地排放在炉内，其轴线与电流方向垂直，坯料周围及上下空隙用焦炭粉填实，顶面用硅砂

和焦炭粉的混合物覆盖，最高加热温度为2600～3000℃。在高温下碳素坯料中的碳原子重新排列形成石墨结构的晶体，即所谓石墨化。炉子的运行是间歇式的，升温和冷却过程受到严格控制，通常一个周期历时约20天，其中通电加热时间约3天。因此，一台电炉变压器常配用10台左右的电炉。电炉是大功率（5000～30 000kV·A）单相负载，使用中要考虑多台电炉平行作业，或为每台电炉配置各相间电平衡装置。变压器二次电路的电抗大，通电末期功率因数显著降低，如图2所示，须加电容器补偿。电炉的电耗视电炉容量和制品石墨化程度在10 000～13 000kW·h/t范围内。

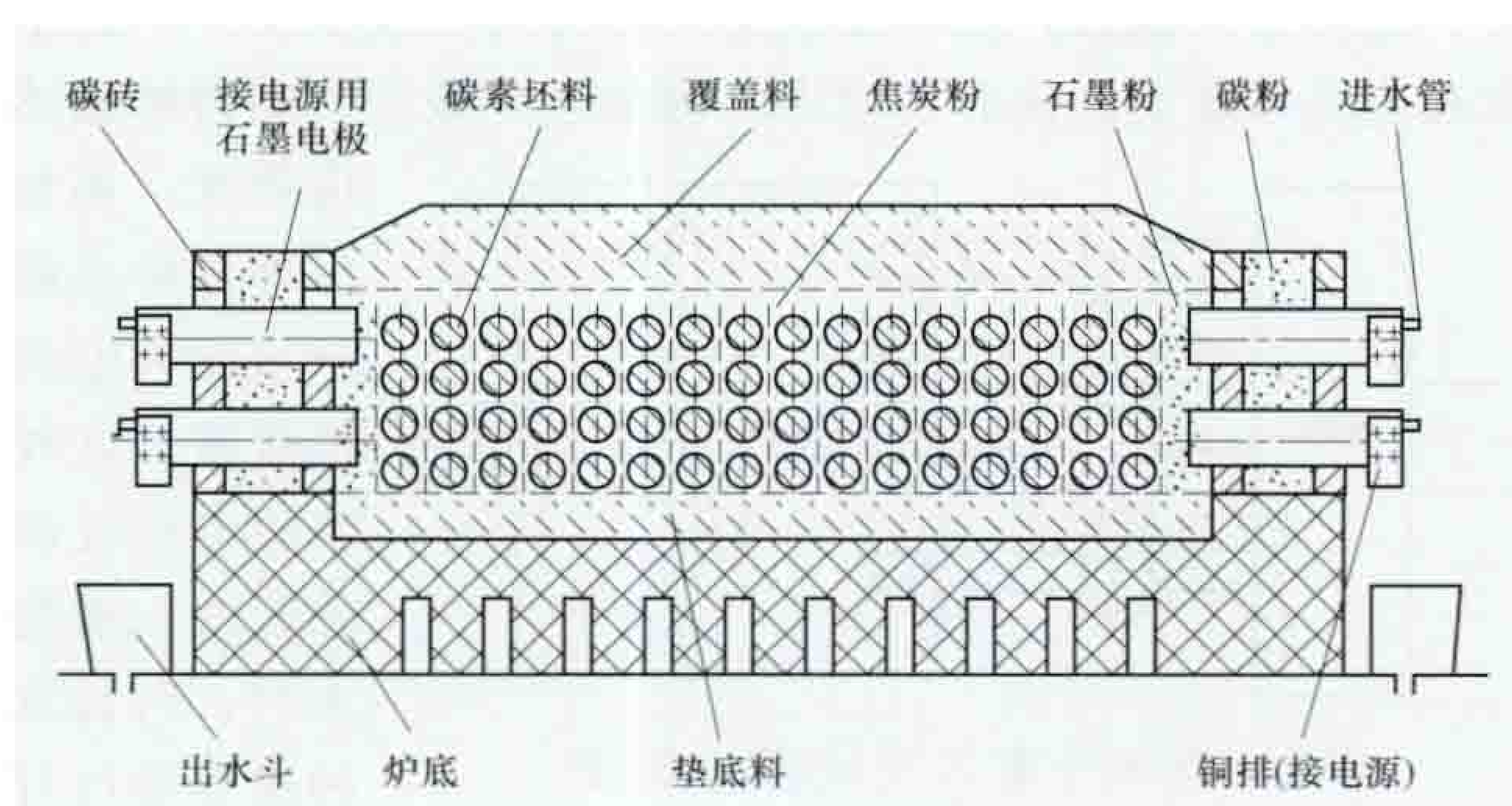


图1　石墨化电炉示意图

石墨化电炉是美国人E. G. 艾奇逊（Edward Goodrich Acheson）于19世纪90年代发明的，主要用于生产炼钢电弧炉用的石墨电极，制品直径可达1500mm。

碳化硅电炉　又称金刚砂电炉，用来烧制碳化硅（SiC）。炉体长为7～20m，宽1.5～4m。原料主要是石英砂和焦炭。由于原料电阻率高，炉料中心部位有一条用石墨或焦炭粒制成的贯通全长的炉芯，以提高开始通电时的输入功率。通电加热到1500℃后，石英砂和焦炭开始反应生成碳化硅。加热温度为1800～2200℃，加热时间25～36h。加热后炉料随炉冷却，总的工作周期为5～7天，其中加热时间1～2天。该炉的供电设施与石墨化电炉的基本相同。电炉变压器的容量为2000～5000kV·A，电耗为7500～12 000kW·h/t。

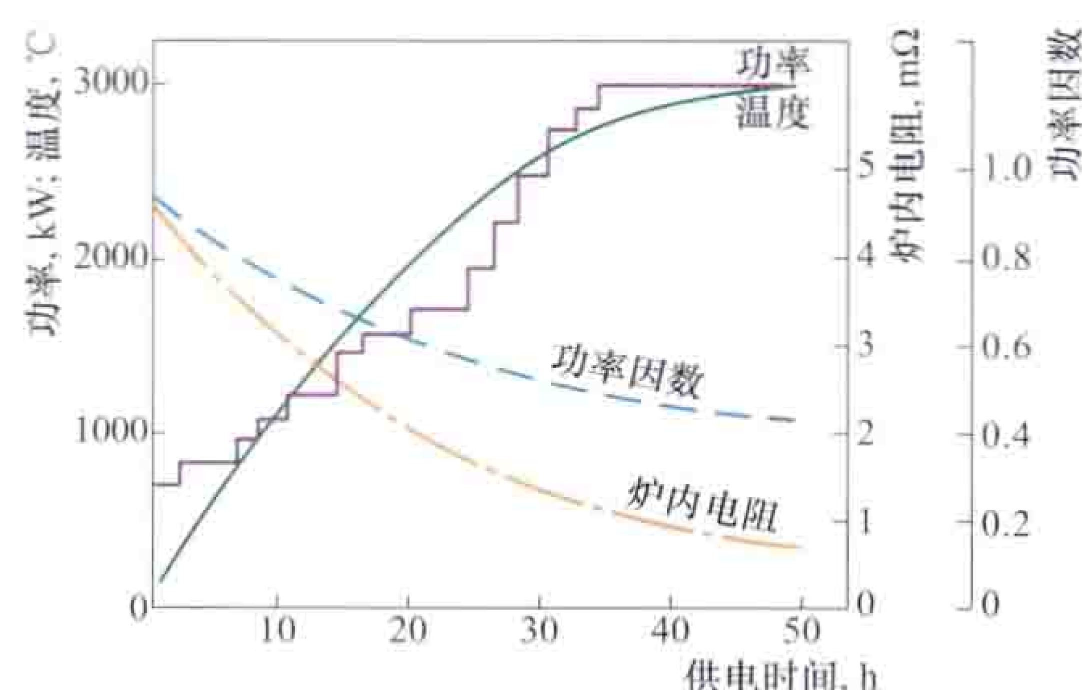


图2　石墨化电炉的供电时间与功率、温度、炉内电阻及功率因数的关系

玻璃窑炉　又称电极玻璃熔化炉，属电极加热。如图3所示，电流由钼、石墨、铁、铂等电极引入玻璃熔池，通过导电熔融玻璃液发热，使之保持一定温度并熔化加入的固体炉料。与用燃料（燃气、重油等）火焰在上部加热的传统玻璃窑炉比，具有炉体小、结构较简单，热效率和生产率较高，玻璃受沾污少、品质高，成分不易挥发，易于调节，对环境污染（废气、噪声等）少、工作条件好且容易实现自动化生产等优点，但大型炉运行费用较高。这种玻璃窑炉多用在生产要求高的光学玻璃或电子玻璃的中小型玻璃炉，也可以与燃料加热结合使用于大型玻璃窑炉。

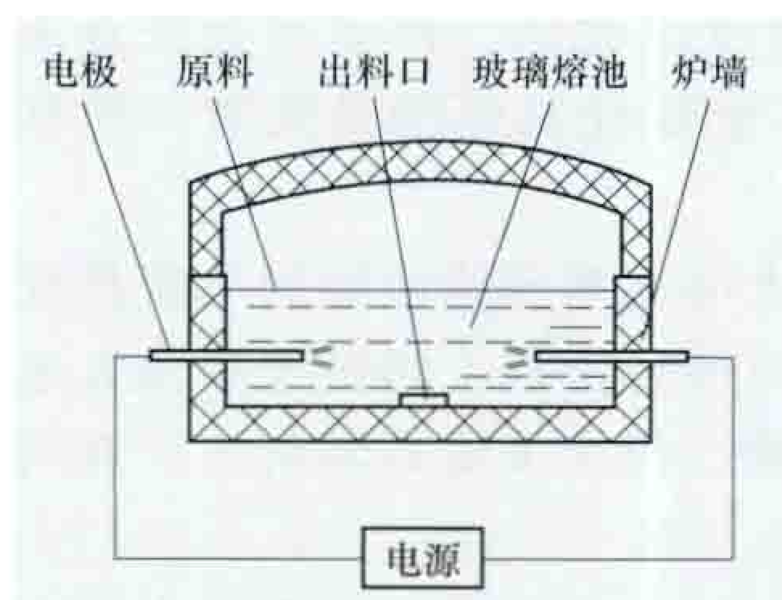


图3　玻璃窑炉示意图

垂直烧结炉　又叫垂熔炉，主要用于钨、钼、铌等管、棒、粉末冶金坯件在真空或惰性气氛中的烧结。这种烧结不但可以得到致密的金属，而且可以去掉烧结体空穴中的残留气体和某些金属杂质，使金属提纯。未经预烧的管、棒坯条夹持在垂熔炉内上下两个电极之间的夹头上进行烧结，在烧结过程中，它的密度、线收缩率、维氏硬度和电阻率都会发生变化，使烧结后的材料性能得到很大的提高。该炉主要由炉体及其机架、炉钟罩、升降机构、加热电极及电极夹持机构（包括固定夹持机构和调整机构）、隔热保温装置、真空系统、水冷系统以及电控系统组成。一般采用磁性调压器供电，炉温为2400℃左右，结构如图4所示。

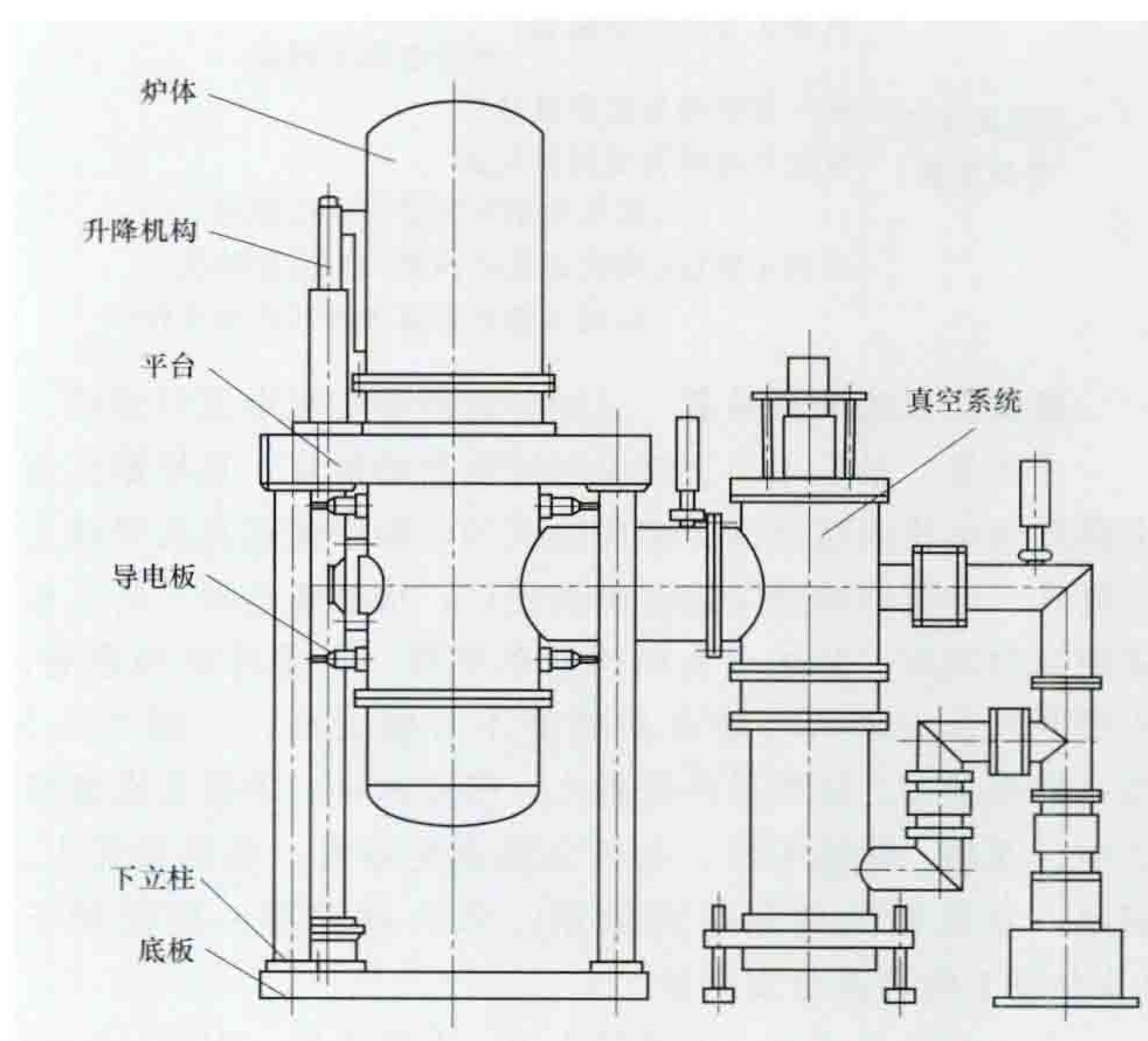


图4　真空垂熔炉结构示意图

电接触加热器　被加热的材料（钢管、钢棒、弹簧钢丝、小截面锻坯等）通常在不加气体保护、不隔热的条件下夹在两个电极夹头之间直接通电加热用的电加热器，一般分单头和多头结构。这种加热器具有加热均匀、加热速度快、生产率高、材料表面氧化脱碳少等优点，但材料截面必须均匀，以免加热时局部温度不均。

电渣重熔炉　钢或某些合金进行再精炼的一种电炉设备。利用电流通过高电阻渣池所产生的热量把电极末端熔化，自耗电极用被熔金属本身制成，熔滴穿过渣池滴入金属熔池，被水冷结晶器冷却凝结成锭。电渣重熔炉应用范围很广，不仅可以用来生产高级航空轴承钢、高温合金、电阻合金、精密合金等，还可用来生产几百吨重的大型优质合金钢锭。

电解液加热装置　由直流电源、电解液槽、工件夹持装置组成。被加热工件连接电源阴极，浸入电极液槽中，槽体接电极阳极，通电发生电解。电解时在工件表面上形成氢气气膜，此膜因电阻值高而发热，从而将工件加热，此装置应用在小工件，如气门顶杆端部加热淬火。由于此装置容易造

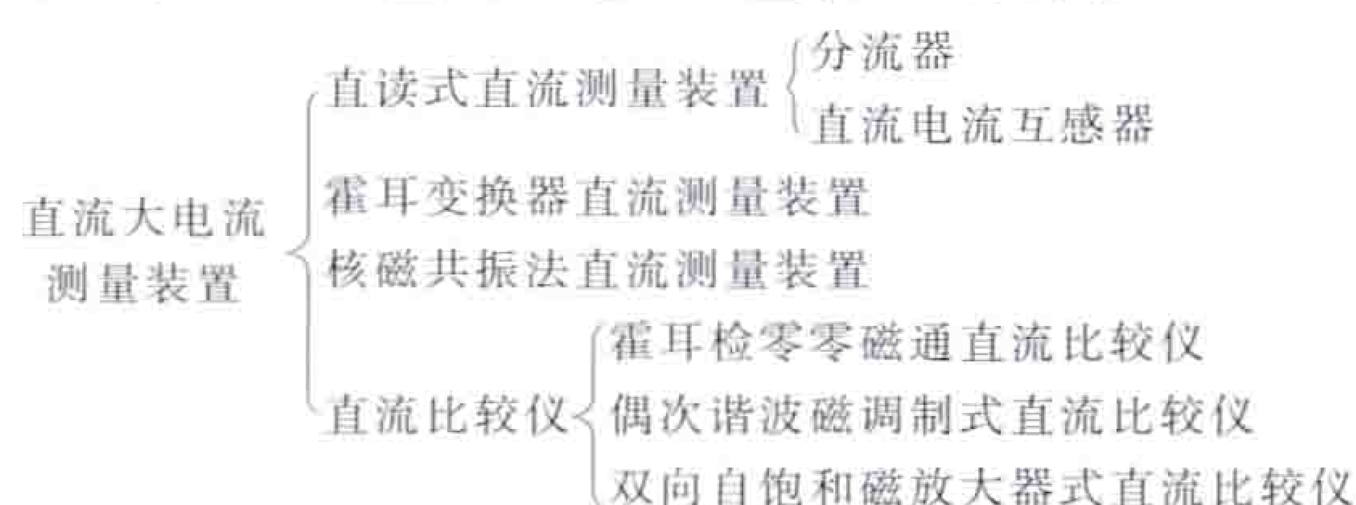
成工件尖角过热，一般很少应用。

zhiliu dadianliu celiang zhuangzhi

直流大电流测量装置 (high DC measuring device)

用于测量直流大电流的仪器和设备。安装在整流器直流输出母线上和整流所汇流母线上。在电解槽系列生产中，在线的直流大电流测量装置所测得的参数是直接衡量电解槽电流效率的主要数据。电解直流电流一般在1kA以上，最高可达500kA。直流电流不能像交流电流那样利用简单的装置即可按比例变换电流值，大电流和不能变换电流值是直流大电流测量的难点。有多种测量槽电流的装置，但都存在一些问题，有的测量精度偏低，有的功率消耗偏大，有的结构复杂维护困难，有的稳定性差等。许多发达国家都在设法攻克这些难题，研制更先进的测量装置，以满足电解工业（见电化学工业）日益发展的需要。

按工作原理，直流大电流测量装置的分类如下：



直读式直流测量装置 包括分流器和直流电流互感器。

分流器 最早用于直流大电流测量的装置，是根据直流电路欧姆定律由锰镍铜合金片组成的电阻串接在直流母线上的量具。分流器的两端接至测量表计，从已知电阻上的电压降测知电流值。其优点为结构简单可靠，不受外磁场影响，不需要辅助电源等。缺点是精度不可能太高，一般为0.5级；量程越大，体积及质量越大，精度越低；串接在直流母线中，安装、检修不便；有色金属消耗量大；功率损耗大。因此，分流器的使用受到限制，单个分流器一般仅用于10kA以下的直流电流测量。

直流电流互感器 由德国人W. 克莱麦尔（W. Kramer）于1936年研制成功。两个磁特性相同的闭合铁芯安装在同一框架内，套在直流母线上。母线即为互感器的一次绕组，每个铁芯各有一个特性相同的二次绕组，反极性串联后接入辅助交流电路中，被测直流电流的变化，改变了交流电路的感抗，也改变了交流电路中电流的大小，从而间接地测出直流电流值，如图1所示。测量范围为100kA以下。直流电流互感器损耗低于分流器，便于安装和检修。其缺点是体积大、笨重；功率损耗大，约为200V·A/kA，50kA时约为10kW，年耗电约87 600kW·h；抗外磁场能力差；精度不高，负载在50%～100%范围内时精度为0.5%；线性度不好。为克服以上缺点，又研制出各种补偿式直流电流互感器，但只能略为改进其测量性能，量程可达100kA以上。

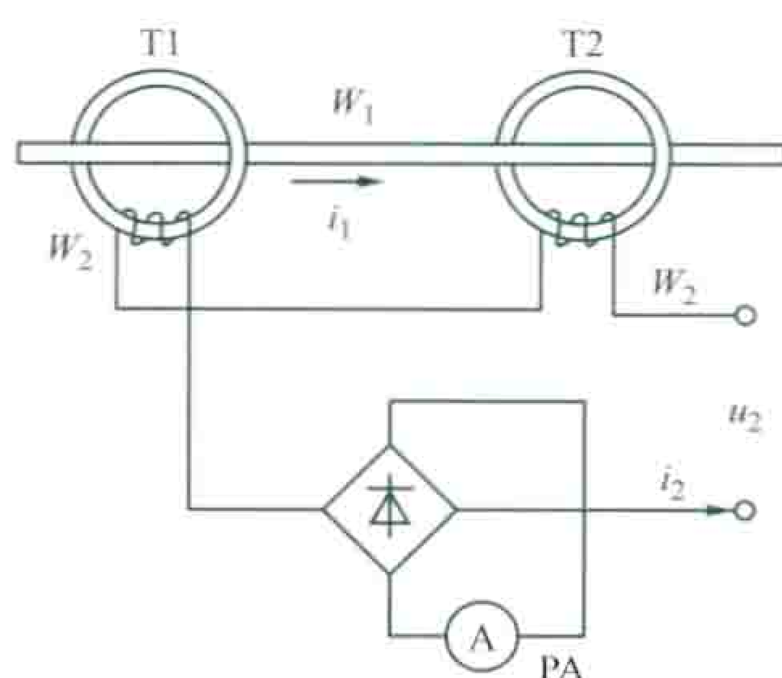


图1 直流电流互感器原理图
T1、T2—铁芯；W_1、W_2—一、二次绕组匝数；i_1、i_2—一、二次电流；PA—直流电流表

霍耳变换器直流测量装置 磁场强度与电流有密切的关系。磁场强度矢量沿空间任一封闭轮廓线积分等于这一轮廓线限定面所穿过的电流，即

$$\oint \boldsymbol{H} \mathrm{d}\boldsymbol{l} = I$$

可近似地表示为

$$\sum \boldsymbol{B} \Delta \boldsymbol{l} = \mu I$$

式中 $\boldsymbol{H}$ 为磁场强度；$\boldsymbol{l}$ 为封闭轮廓长度；$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度；μ 为磁导率；I 为电流。因此，可以利用电磁变换器测量电流，实用中多以霍耳变换器作为电磁变换器。

将多个（偶数）霍耳变换器对称排列以减少误差，放至套在直流母线上的铁芯气隙内。测量各个铁芯气隙内的磁感应强度，相加后即可得出被测直流大电流的数值。这种装置的线性误差较大，温差大时，对装置的稳定运行有很大影响。图2所示为有4个霍耳变换器的直流大电流测量装置的框图。

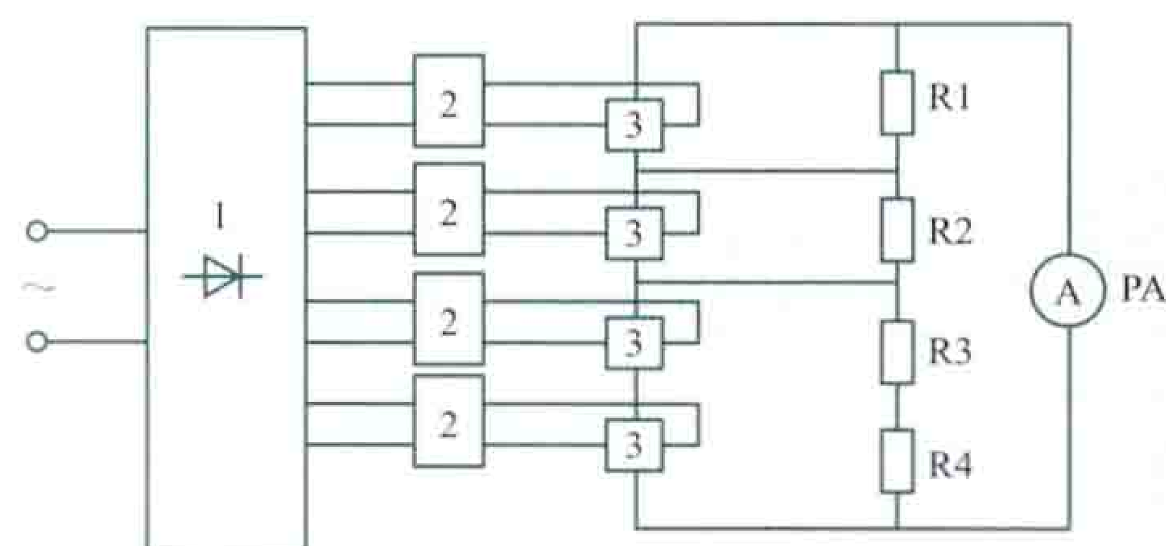


图2 有4个霍耳变换器的直流大电流测量装置框图
1—整流器；2—稳压器；3—霍耳元件；R1～R4—标准电阻器；PA—电流表

核磁共振法直流测量装置 由苏联人C. A. 斯佩克托尔（C. A. Спектор）于20世纪70年代研究成功。在圆柱形I/B变换器的气沟内可获得均匀磁场，其磁感应强度与被测直流大电流的变换系数K_1可根据变换器的几何尺寸计算或测定出来，其框图见图3。计算式为

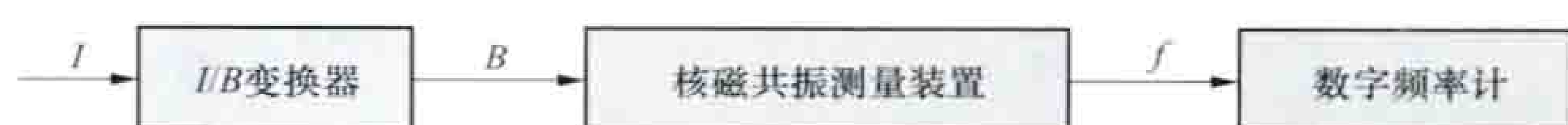


图3 核磁共振法测量直流大电流方框图

$$B = K_1 I \tag{1}$$

式中 B 为 I/B 变换器的磁感应强度；K_1 为变换系数；I 为被测电流。

在均匀恒定的磁场中，具有自旋角动量的原子核发生运动，运动共振频率 f 与磁感应强度 B 之间有下列关系

$$f = \frac{1}{2\pi} r B \tag{2}$$

式中 r 为所用物质的原子核磁回旋比，系物理常数；f 为运动共振频率或原子核运动频率。将式（1）代入式（2），得

$$I = 2\pi f/(rK_1) = Kf$$

式中 K 为整个测量装置的常数。可见只要准确测出物理量 f，即可测得电流值，并可直接读出数值。核磁共振法直流测量装置的量程为35kA，尚不能取代其他测量装置，但却是大电流测量的发展方向。

直流比较仪 将被测直流大电流和量值已知的电流都变为与电流有密切关系的磁量，再进行比较，间接地获得大电流值的装置，有霍耳检零零磁通、偶次谐波磁调制式、双向自饱和磁放大器式等多种形式。

霍耳检零零磁通直流比较仪 在上述霍耳变换器直流大电流测量装置的每段铁芯上，各增加一组由独立直流电源供

电的平衡绕组。当各平衡绕组产生的磁通势和被测电流在各段铁芯和气隙上所产生的磁通势不平衡时，霍耳变换器有输出，平衡时无输出，如图 4 所示。其量程可达 400kA，具有精度较高（一般为 ±0.2%），受外磁场及温度变化的影响较小，质量较轻，具有开口铁芯，装拆维修方便，损耗较小（20V·A/kA 以下），线性度不理想，通道、元件多，故障机会较多等特点。

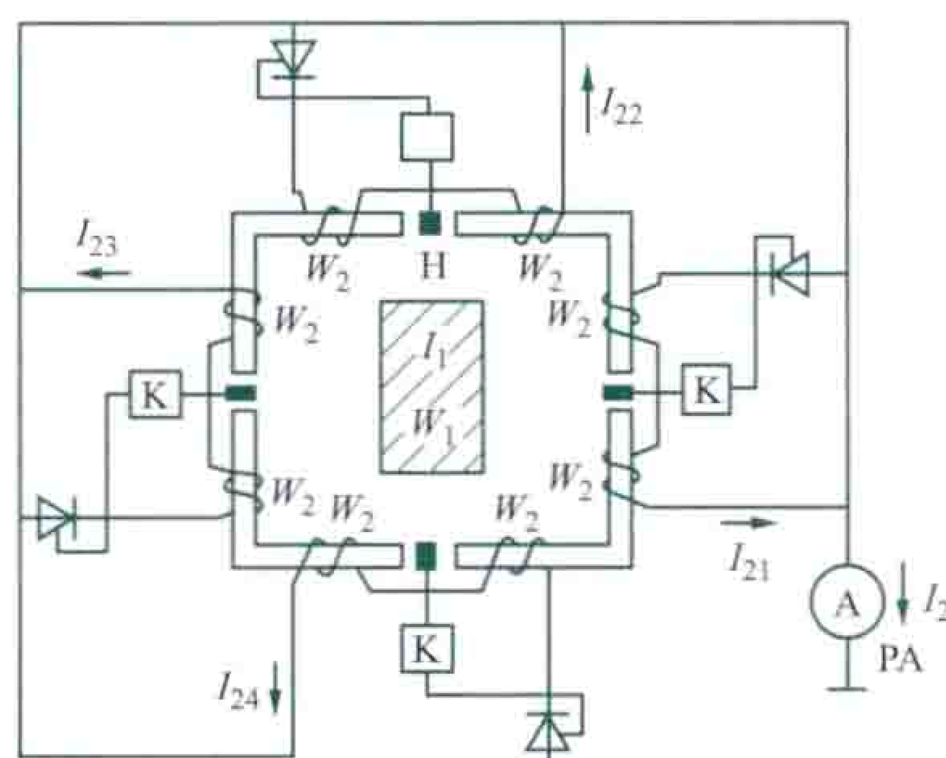


图 4　四通道霍耳检零零磁通直流比较仪原理图

H—霍耳变换器；W_2—各段平衡绕组匝数；I_{21}～I_{24}—各段平衡绕组中的电流；I_1、W_1—被测母线电流及母线匝数；I_2—总平衡电流；K—放大器；PA—电流表

偶次谐波磁调制式直流比较仪　如图 5 所示，直流母线穿过两个特性相同的铁芯，一个绕组 L2 同时绕在两个铁芯（匝数各为 W_2）上，I_1W_1 和 I_2W_2 的磁通势方向相反，特性相同的两个绕组 L3（匝数为 W_3）反极性绕在两铁芯上，L3 的交流电源波形必须与横轴对称，当 $I_1W_1=I_2W_2$ 时，两铁芯中磁通分别为

$$\phi_{T1}=f(t)=\Phi_0+\Phi_{1m}\sin(\omega t+\varphi_1)+\Phi_{2m}\sin(2\omega t+\varphi_2)+\Phi_{3m}\sin(3\omega t+\varphi_3)+\Phi_{4m}\sin(4\omega t+\varphi_4)+\cdots \tag{3}$$

$$\phi_{T2}=-f\left(t+\frac{t}{2}\right)=-\Phi_0+\Phi_{1m}\sin(\omega t+\varphi_1)-\Phi_{2m}\sin(2\omega t+\varphi_2)+\Phi_{3m}\sin(3\omega t+\varphi_3)-\Phi_{4m}\sin(4\omega t+\varphi_4)+\cdots \tag{4}$$

由式（3）、式（4）可知，T1 和 T2 中磁通奇数次谐波分量的振幅相同、相位相同，偶次谐波分量的振幅相同而相位相反，故磁调制器的输出电压为

$$u_3=W_3\left(\frac{\mathrm{d}\phi_{T1}}{\mathrm{d}t}-\frac{\mathrm{d}\phi_{T2}}{\mathrm{d}t}\right)=W_3\frac{\mathrm{d}(\phi_{T1}-\phi_{T2})}{\mathrm{d}t}=2W_3[2\omega\Phi_{2m}\cos(2\omega t+\varphi_2)+4\omega\Phi_{4m}\cos(4\omega t+\varphi_4)+\cdots] \tag{5}$$

式中 W_3 为交流励磁绕组匝数；φ 为谐波相位角。可见输出电压为交流励磁电流频率的 2 倍频率的偶数函数，不含有感应电压中的奇次谐波分量。用滤波器除去不需要的偶次谐波，只保留需要的 2 次谐波。在忽略绕组电阻及磁滞损耗的情况下，当 $I_2W_2\neq I_1W_1$ 时，铁芯中的磁场强度只影响感应电压 u_3 的 2 次谐波幅值而不会引起相位的变化。

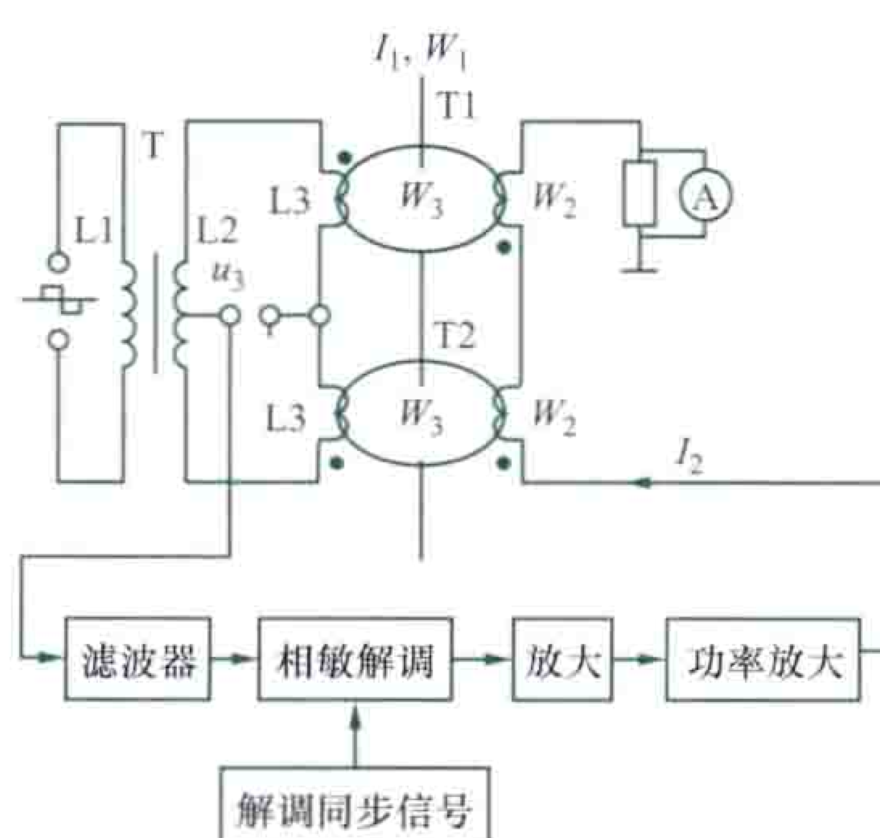


图 5　磁调制式比较仪原理图

I_1、W_1—直流母线中的电流及母线匝数；I_2、W_2—平衡绕组中的直流电流及绕组匝数；W_3—交流励磁绕组匝数；T—电源变压器；T1、T2—铁芯

磁调制式直流比较仪的特点是精度较高，可达 0.02%～0.05%，线性度好，工作稳定；能耗小，约为 20V·A/kA；抗外磁场干扰能力强，受温度变化的影响小；开口铁芯，安装拆卸维修方便；电路较复杂，环节多，故障机会多。

双向自饱和磁放大器式直流比较仪　由中国华中科技大学在德国 W. 克莱麦尔研制的直流比较仪的基础上研制成功。它由传感器、比例积分放大器、晶闸管触发器、晶闸管整流器等 4 个主要部分组成。如图 6 所示，当 $I_1W_1=I_2W_2$ 时，差动磁通势 $\Delta F=I_1W_1-I_2W_2=0$，$U_{ab}=0$。当 $\Delta F=I_1W_1-I_2W_2\neq0$ 时，$U_{ab}=(i_{a1}-i_{a2})R_L$。$\Delta F$ 越大则 U_{ab} 越大，I_2 也越大，使 I_1W_1 和 I_2W_2 趋于平衡。当电流比较仪的增益足够大时，ΔF 极小，可忽略不计，则 $I_1W_1=I_2W_2$。又 $I_2=\frac{U_0}{R_s}$，所以，$I_1=\frac{W_2}{W_1}\times\frac{U_0}{R_s}=KU_0$，式中 K 为变换系数；U_0 为 R_s 上的电压降。

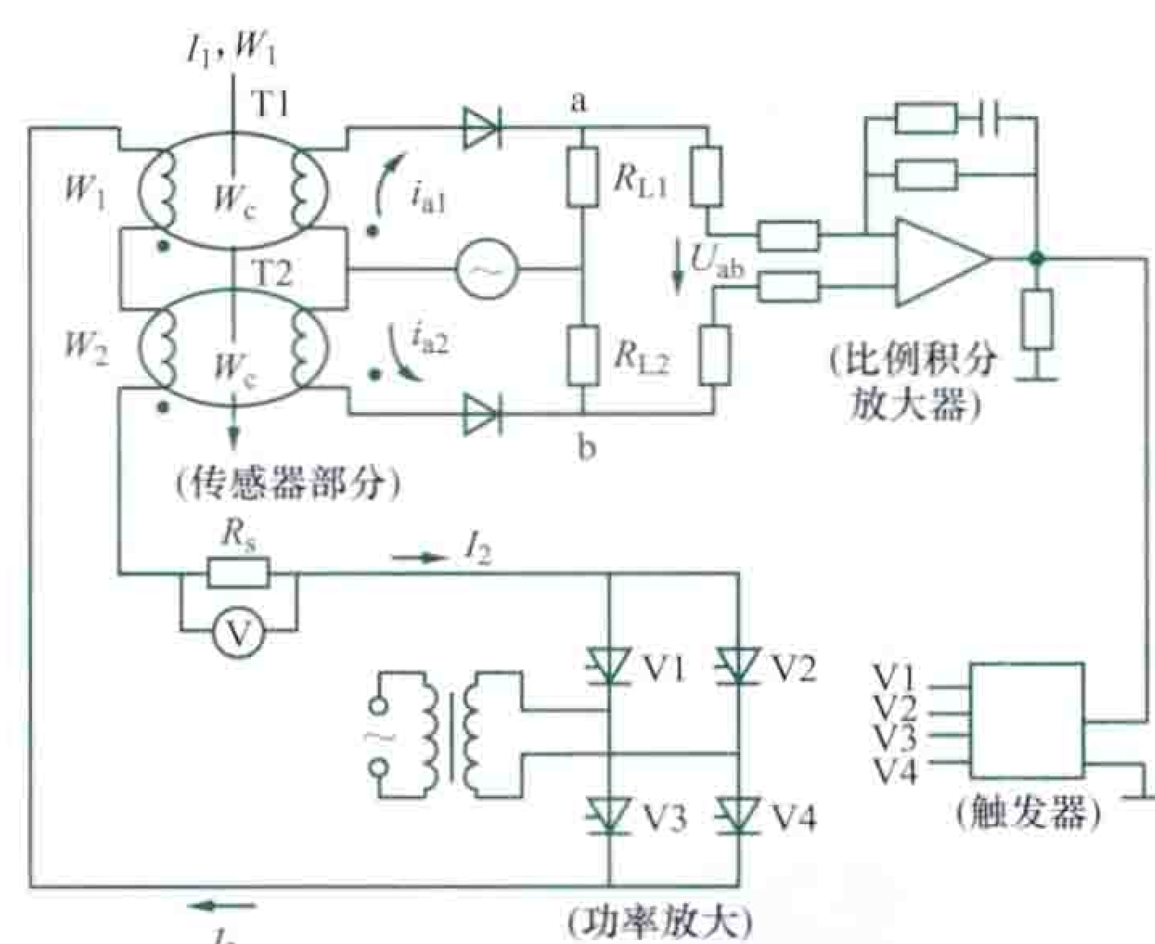


图 6　双向自饱和磁放大器式直流大电流比较仪原理图

T1、T2—铁芯；I_1—被测直流大电流；W_1—被测直流母线匝数；I_2—平衡电流；W_2—平衡绕组（1 个）匝数；W_c—磁放大器绕组匝数；R_{L1}、R_{L2}—电阻；U_{ab}—传感器平均输出电压；R_s—标准电阻

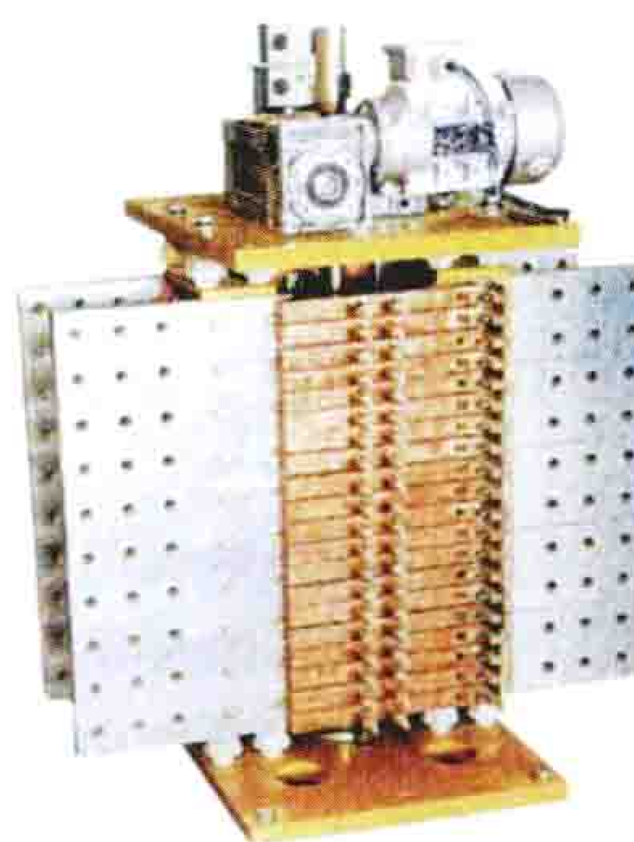
双向自饱和磁放大器式直流大电流比较仪的特点是准确度高、线性度好；损耗小，约 12V·A/kA；电路简单、工作可靠，开口铁芯，安装维修方便；受外磁场干扰和温度变化的影响小；质量轻、成本低。

zhiliu dadianliu geliqi

直流大电流隔离器　（DC high-current isolator）

一种能够在空载时接通和断开直流大电流回路、在断开位置上具有隔离功能的机械开关电器。主要应用于电解行业，安装于直流大电流母线上。

直流大电流隔离器的结构主要包括动板、静板、电动机构、压缩弹簧机构、主轴、底座等，如图所示。隔离与接通直流电路主要依靠动板的开合来完成。隔离器在分闸状态下，动、静板之间有明显的可视隔离间隙；在接通状态下，不但可以长期承受正常的工作电流，而且可以在一定时间内承受非正常状态下的短路电流。



直流大电流隔离器

直流大电流隔离器的特点包括：①用于户内，便于安装、调试与维护；②运行损耗小，隔离器温度低，节约能源；③具有较

高的机械寿命与电气寿命，性能可靠、稳定；④具有手动、电动操作方式，操作灵活，便于现场检修和远程控制；⑤触头采用银合金，提高通流容量，并且动、静触头可独立拆分，便于隔离器的清洁、维护与维修；⑥具有辅助开关，用于电气回路联锁；⑦采用空气冷却。

zhiliu diandongji

直流电动机 （direct current motor；DC motor）

依靠直流电源运行的电动机。直流电动机（见图1）把直流电能转换为机械能。电池是最早提供直流电能的电源，因此直流电动机于1821年先于任何其他电动机而问世。



图1 直流电动机

特点 直流电动机的优点有：①能够在宽广的范围内平滑而经济地调速；②起动、制动、过载转矩大；③容易控制。直流电动机广泛应用于起动、调速性能要求较高的场所，如用于电力机车、地下铁道、城市无轨电车、机床、纺织机、造纸机、起重设备以及轧钢机等的驱动。直流电动机的缺点有：由于有换向器，故要消耗较多的有色金属（铜）；运行时电刷与换向器的滑动接触易产生火花并造成磨耗，还需经常维修；制造工艺复杂，费工时。与交流电动机相比，直流电动机造价昂贵，运行可靠性较差，功率和转速容许值偏低，因而应用受到一定的限制。

分类 直流电动机一般按励磁方式分为永磁直流电动机和电流励磁直流电动机。励磁磁场由永磁体建立的叫永磁直流电动机。电流励磁直流电动机又分他励、并励、串励和复励直流电动机，连接线路如图2所示。

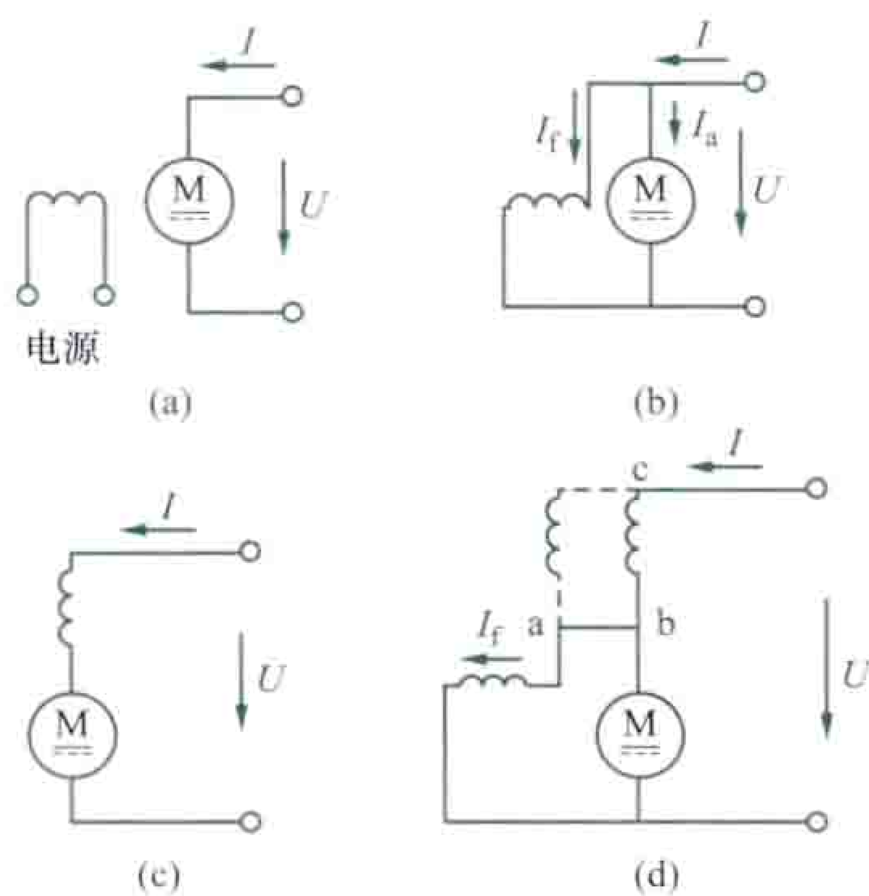


图2 电流励磁直流电动机连接线路图

(a) 他励直流电动机；(b) 并励直流电动机；(c) 串励直流电动机；(d) 复励直流电动机

结构 直流电动机有定子和转子（电枢）两大部分，它们之间有气隙。定子包括机座、主磁极、换向极、电刷装置等。转子包括电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴等。此外，还有机械支撑部件、冷却和防护装置。图3所示为直流电动机结构示意图。

机座 一方面用来固定主磁极、换向极和端盖等，并通过底脚将整个电动机固定在基础部件上；另一方面作为磁轭，以构成主磁通的闭合回路。为保证具有良好的导磁和机械性能，机座常用铸钢或钢板焊成。

在调速要求高的电动机中，机座的机械支撑与磁轭的导磁作用分开。磁轭用几毫米厚的涂漆薄钢板叠成，固定在专起机械支撑作用的机座上。这样的机座可用铸铁，微电动机机座则可用铸铝，大型电动机机座常用钢板焊成。为进一步改善换向性能及动态性能，可将主磁极、换向极、磁轭一起用整片的硅钢片冲成，形成全叠片式结构。

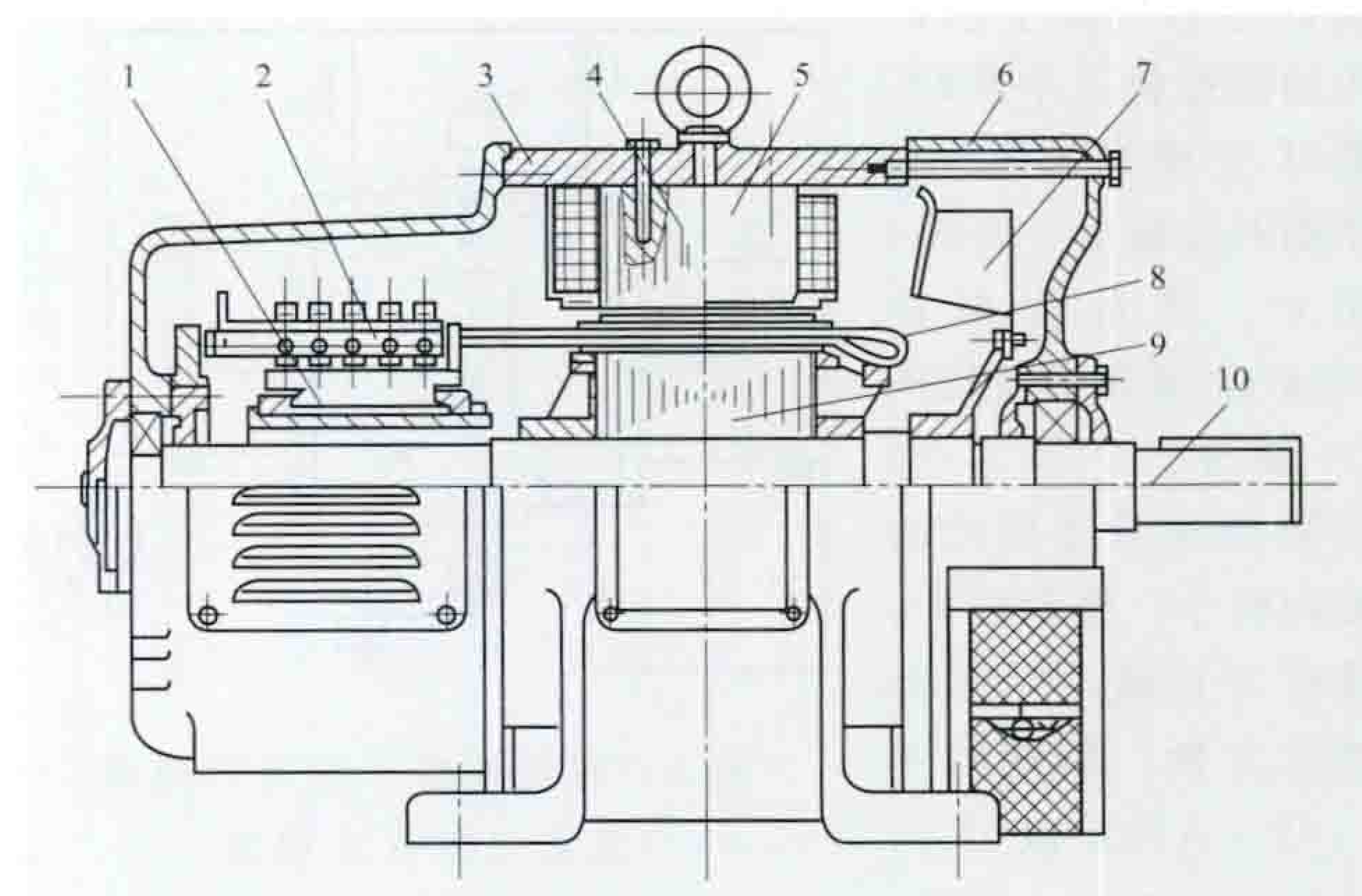


图3 直流电动机结构示意图

1—换向器；2—电刷装置；3—机座；4—主磁极；5—换向极；6—端盖；7—风扇；8—电枢绕组；9—电枢铁芯；10—转轴

主磁极 也叫主极，如图4所示。它的作用是：当固定在它上面的励磁绕组通入直流电流后，使电枢表面的气隙磁密按一定形状在空间分布。主磁极铁芯常用1～1.5mm厚的低碳钢板冲成冲片，再叠压成整体，用螺钉固定在机座上。主磁极总是成对出现，其极性沿圆周N、S交替分布。在大容量电动机中，通常在主磁极的极靴上开槽，安置与电枢电路串联的补偿绕组，以抵消电枢反应磁通势。

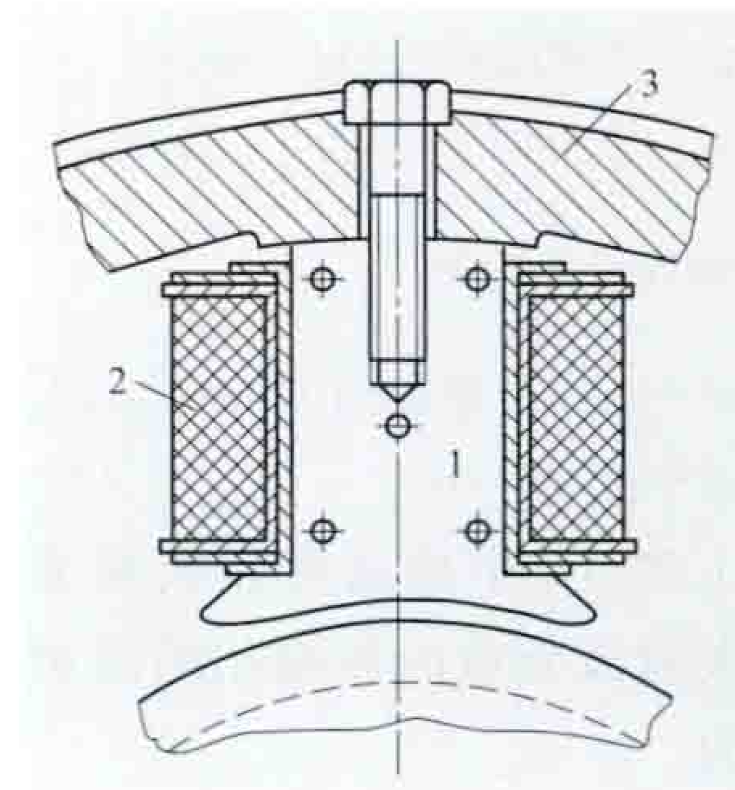


图4 直流电动机主磁极

1—主磁极铁芯；2—励磁绕组；3—机座

换向极 又叫附加极或间极，用来改善换向。通常与主磁极数目相同，放在相邻两主磁极之间。换向极常用整块钢板或钢片绝缘后叠装而成，其外面所套的换向极绕组由扁铜线绕成，并与电枢绕组串联。

电刷装置 通过它把外部静止电路的电流引入电动机转动的电枢绕组中。它由电刷（一般是碳-石墨材料）、刷握（又称刷盒）、刷杆和刷杆座等组成。

电枢铁芯 主磁路的一部分。通常用0.5mm厚的低碳硅钢片或冷轧硅钢片叠成，片间涂漆，外圆开槽，以嵌放电枢绕组。

电枢绕组 实现电能转换为机械能的关键部件。它由许多线圈（也叫元件，由带绝缘的导线绕成）按一定的规律连接而成。

换向器 可将外面通入电刷的直流电流转变为电枢绕组的交变电流。它由许多换向片组成，片间有绝缘（多用云母）。换向片由铜制成，尾端开沟或接有连接片（称升高片），以便焊接线圈的端线。每个线圈的两个端线按一定规律分别接到两个换向片上，而接到同一换向片的两个端线分属两个线圈，这样，就把各个线圈连接起来成为电枢绕组。换向器的结构如图5所示。

转轴　用于电动机转动工作中承受弯矩和扭矩的轴。

机械支撑部件　在小电动机中电枢铁芯直接套在转轴上。在较大电动机中，在铁芯和转轴之间还有一个转子支架。

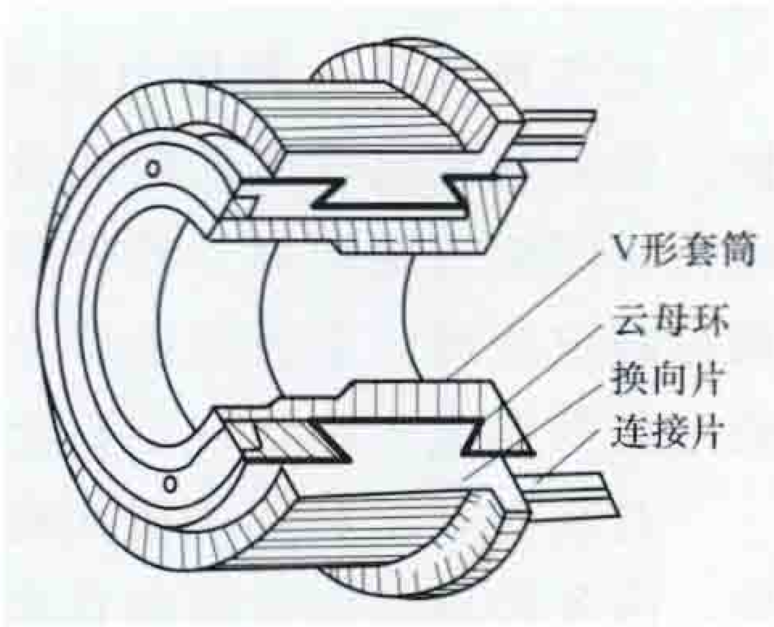


图5　换向器结构

中、小型电动机一般用滚动轴承，轴承支撑在固定于机座两端的端盖上。大型电动机用滑动轴承，轴承通过支架直接支撑在基础部件上。

冷却及防护装置　按照电动机功率大小和使用条件，电动机有不同的冷却及防护装置。例如防护式电动机在转轴上装有风扇，在端盖的进出风口上装着有孔的网罩。大容量电动机常用管道式通风，用另外的风机对电动机进行吹风循环，电动机外的冷风和电动机内的热风分别由管道引入和带走。在含有可燃气体的场所，如矿井中，电动机应做成防爆式，机壳要有较高的机械强度，封闭得更严密，包括转轴伸出处的轴封部分。

工作原理　图6所示为直流电动机工作原理示意图。线圈abcd放在电枢槽内。假设外部直流电流 I 从电刷A经换向片流进电枢上的线圈abcd后，自另一换向片经电刷B流出。电动机中磁场方向如图6所示。根据左手定则，在图6(a)和图(b)中，载流导体ab、cd受电磁力而产生的电磁转矩总是逆时针方向，这是因为当导体位于不同极性的磁极下时，由于换向器使导体中流过的电流方向也改变，从而使电磁转矩的方向保持不变。电磁转矩随时间变化的波形如图6(c)所示，图中电磁转矩有很大脉动，为了减少脉动，可以增加线圈数目。通常，每极下的线圈数目大于8时基本上可以消除脉动情况。

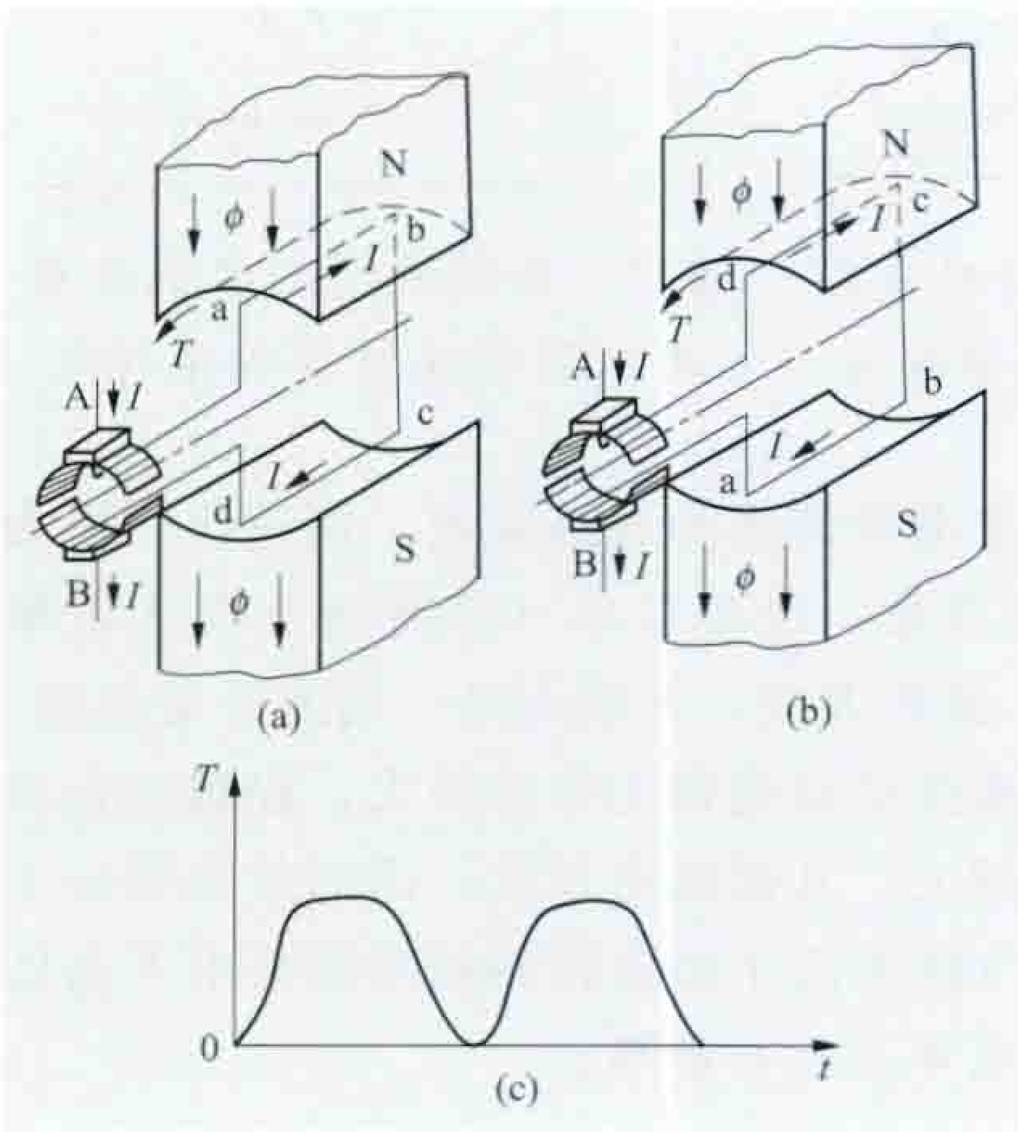


图6　直流电动机工作原理示意图
(a)、(b) 平均电磁转矩的产生；
(c) 电磁转矩随时间变化的波形

关键技术　主要有直流电动机的换向和整流电源供电。

换向　提高直流电动机单机容量和工作可靠性的主要问题是换向器上的火花问题。直流电动机工作时，电枢绕组各线圈不断地从一条支路经电刷短路后，换到另一条支路，线圈中的电流也不断地改变方向，这就是换向。换向不好时，会在电刷和换向器之间产生火花。火花超过一定限度时，会使电刷和换向器磨损加剧，从而缩短电刷寿命。严重时，还会使换向器表面发生环火（换向器圆周表面出现一圈明亮的火环，也叫放炮），损坏电动机。此外，换向器上的火花还会对无线电通信产生干扰。

在中国，直流电动机换向的火花分为1，$1\frac{1}{4}$，$1\frac{1}{2}$，2，3共五个等级，见表。一般用途的直流电动机从空载到额定负载的所有情况下，火花等级应不超过 $1\frac{1}{2}$ 级。

改善换向的方法有：移动电刷位置；合理选择电刷牌号；装置换向极；装置补偿绕组。

(1) 移动电刷位置。电刷逆着电动机转向移动一个小距离，使换向线圈的两个有效边处于主磁极的后极尖处。移动的距离以不超过所允许的火花级别为准。负载变动时，电刷位置必须做相应的移动。这种方法只在没有装置换向极的小电动机中采用。

直流电动机换向的火花等级

火花等级	电刷下的火花程度	换向器及电刷的状态
1	无火花	换向器上没有黑痕，电刷上没有灼痕
$1\frac{1}{4}$	电刷边缘仅小部分（1/5～1/4刷边长）有断续的几点点状火花	
$1\frac{1}{2}$	电刷边缘大部分（大于1/2刷边长）有连续的、较稀的颗粒状火花	换向器上有黑痕，但不发展，用汽油擦其表面即能除去，同时在电刷上有轻微灼痕
2	电刷边缘大部分或全部有连续的、较密的颗粒状火花，开始有断续的舌状火花	换向器上有黑痕，用汽油不能擦除，同时电刷上有灼痕，如短时出现这一级火花，换向器上不出现灼痕，电刷不会被烧焦或损坏
3	电刷整个边缘有强烈的舌状火花，伴有爆裂声音	换向器上黑痕较严重，用汽油不能擦除，同时电刷上有灼痕，如在这一火花等级下短时运行，则换向器上将出现灼痕，同时电刷将被烧焦或损坏

(2) 合理选择电刷牌号。不同牌号的电刷具有不同的接触电阻。电刷的接触电阻大，可以改善换向，但增加了电刷接触处损耗，使发热加剧。一般中、小型电动机，大多采用石墨电刷；牵引电动机和电车电动机，必须采用电化石墨电刷；低电压大电流的电动机，宜采用含铜石墨电刷。

(3) 装置换向极。换向极装在两主磁极之间，通常与主磁极的极数相等，换向极绕组和电枢绕组串联。换向极的极性与逆转向的下面主磁极的极性相同。对于换向有特殊困难的电动机，采用全叠片式。

(4) 装置补偿绕组。导线嵌在磁极极靴的槽中，补偿绕组与电枢绕组串联，其电负荷应设计得与电枢的电负荷相等（一般补偿程度为80%～105%）。补偿绕组只在大容量以及工作条件比较困难的直流电动机上装设。

整流电源供电　直流电动机最初由电池供电，经历了直流发电机、交流电动机驱动直流发电机、用整流器件（如水银整流器、闸流管、引燃管等）将交流电整流成直流电供电、用晶闸管相控整流电源供电，以及用脉冲宽度调制（pulse width modulation，PWM）整流电源或DC/DC电源供电。

晶闸管相控整流装置网侧功率因数偏低，对电网的电能质量影响严重。另外，其输出电压波形低次谐波丰富，

通常需要增加较大滤波装置才能提供给直流电动机。采用PWM整流电路或DC/DC电源供电是解决上述问题的良好方案。PWM整流电路采用全控型开关器件进行高频脉冲宽度调制，可以将交流电源输入电流控制为畸变很小的正弦化电流，功率因数也可控制到接近1，其体积、质量也较传统整流电路小。晶闸管整流电源仅用于一些容量偏大、调速动态性能要求不高的场合。中、小容量和高性能系统都已采用基于全控型电力电子器件的PWM整流电源或DC/DC电源。

zhiliu diandongji baohu

直流电动机保护 （protection of DC motor） 对直流电动机运行中出现的故障和危及安全运行的异常工况所采取的保护措施。直流电动机在起动、制动或正常运行中，当其供电电源系统、直流电动机自身及其负载出现故障或者危及安全运行的异常工况时，直流电动机保护将自动切断电源，或者给出信号由值班人员消除异常工况的根源，以减轻或避免直流电动机及其他设备的损坏和对由同一直流电源供电的用户的影响。

在电力电子变换器应用于直流电动机驱动之前，直流电动机保护常用继电器来实现。继电器是当输入物理量（电量或非电量）达到规定值（整定值）时，其电气输出电路被接通（导通）或分断（阻断、关断）的一种电器。

在采用电力电子变换器供电的直流电动机中，直流电动机保护常通过停止变换器工作的方式来实现。在检测到出现上述故障时，通过控制电力电子开关器件关断来使变换器停止工作，使直流电动机与电源之间断开，实现对直流电动机的保护。

中、小容量低压直流电动机保护包括过电流保护、过电压保护、零励磁保护。大容量高压或特殊用途直流电动机，除过电流保护、过电压保护、零励磁保护外，还设有接地保护、过载保护、过速保护和快速过电流保护。

过电流保护　利用过电流继电器构成的一种电枢回路保护。过电流使直流电动机的温升超过最大的长期容许值（额定值），加速绕组绝缘的老化，并使换向变坏。过电流越严重，这种威胁越大，严重时可在短时间内损坏直流电动机绕组和换向器。因此，当直流电动机电枢电流超过规定的切断电流值时，过电流继电器动作，瞬时切断直流电动机电枢回路的电源，防止过电流的继续存在和发展。

过电压保护　利用过电压继电器构成的一种电枢回路保护。当供电电源电压过高或控制系统不完善，使换向片间电压过高时，过电压继电器动作，瞬时切断直流电动机电枢回路的电源，以免换向器出现环火和损坏。

零励磁保护　利用电流继电器构成的励磁回路保护。当直流电动机的励磁电流消失和过小时，电枢电流将急剧增大，转子转速同时也迅速升高，致使电流和转速都可能远远超过规定值，电枢绕组可能被烧坏，转子将因机械强度不足而可能受到破坏，换向器因换向严重恶化而被损坏。为此，当一出现励磁电流小于某一规定值时，电流继电器动作，瞬时切断直流电动机的电源。对于采用磁场反向的快速可逆系统，则不设置零励磁保护。

接地保护　利用电压继电器构成的接地保护。当直流电动机的任一点发生接地时，电压继电器动作，发出警告信号或切断电源。

过负荷保护　利用电流继电器构成的一种电枢回路保护。如果直流电动机长时间处于过负荷状态，其电枢电流也将长时间超过额定值，致使绕组过热。一般当直流电动机出现过载电流时，电流继电器动作，并发出警告信号。对不同的过负荷电流大小，规定有允许的运行时间。

过速保护　利用机械式离心开关构成的一种转子过速保护。由各种原因所造成的直流电动机转速过高，将导致换向器环火或转子的损坏，故应瞬时切断直流电动机的电源。

快速过电流保护　采用快速开关构成的过电流保护。对由晶闸管或二极管整流电源供电的直流电动机，为迅速切断电流，在主回路中设置了毫秒级动作时间的直流快速开关。

zhiliu diandongji dianshu chuandianzu tiaosu

直流电动机电枢串电阻调速 （armature rheostat speed control of DC motor） 通过改变直流电动机电枢回路中串入的电阻值实现直流电动机调速的技术。各种直流电动机都可以通过改变电枢回路中串入的电阻值来调速。

图1所示为他励直流电动机电枢串电阻调速时的机械特性。图中n为未串电阻时的转速，当负载一定时，随着串入电阻R_q的增大（$R_{q3}>R_{q2}>R_{q1}>R_q$），电动机转速不断降低（$n_3<n_2<n_1<n$）。图2所示为串励直流电动机电枢串电阻调速时的机械特性，也可以通过改变串入电阻R_q来改变转速，R_q增大，电动机转速降低。

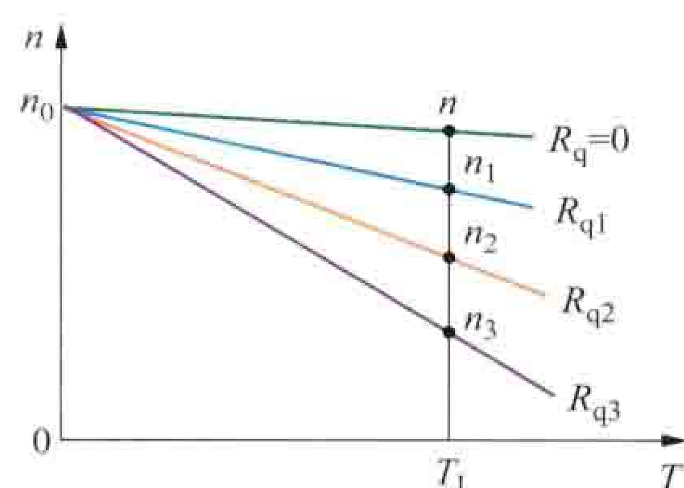


图1　他励直流电动机电枢串电阻调速时的机械特性

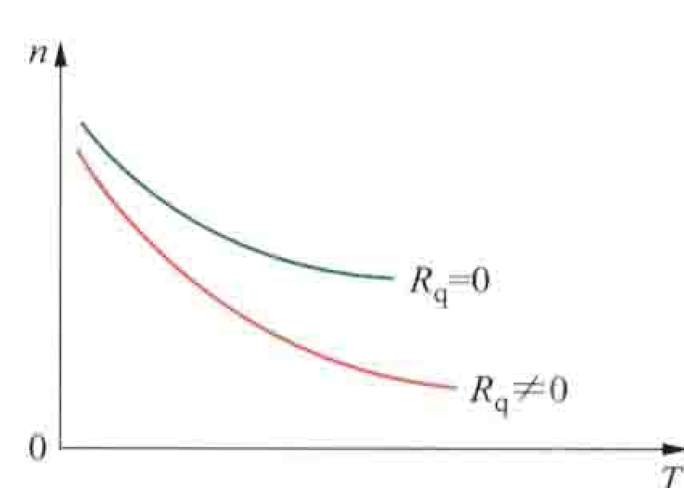


图2　串励直流电动机电枢串电阻调速时的机械特性

直流电动机电枢串电阻调速为有级调速，调速比一般为2∶1以下。其主要优点是：设备简单（只需增加串入电阻和切换电阻的开关），操作方便。其缺点是：调速平滑性差；低速时的特性软，转速受负载变化的影响较大；轻载时很难实现低速；串入电阻越大，其损耗也越大，因而效率明显下降。因此，这种调速方法多用于对各种调速性能要求不高的设备上，如起重机、城市无轨电车等。

zhiliu diandongji henggonglü tiaosu

直流电动机恒功率调速 （speed control of DC motor with constant power） 在全部调速范围内，直流电动机输出功率的最大允许值不变的调速方法。合理使用直流电动机就是既要保证它的使用寿命，又要使它得到充分利用。为此，应该使电动机在不同转速下长期运行时，保证电枢电流I_a等于额定值I_N。这是因为电动机长期运行时，如果电枢电流不超过额定值，就不会因过热而降低其使用寿命。但是如果长期在$I_a<I_N$的情况下运行，则因为I_a小，输出转矩和功率也小，电动机不能得到充分利用。

直流电动机恒功率调速时，保持 $I_a=I_N$ 不变，则其最大允许输出功率也保持不变。实际上是电动机的电磁功率 P_M 而不是输出功率 P 的最大允许值保持不变，P_M 比 P 多了空载损耗，一般空载损耗很小。恒功率调速是用来表征电动机采用这种调速时的带负载能力，并不是指电动机的实际负载功率为恒值。直流电动机调磁调速属于恒功率调速。

在他励直流电动机弱磁调速时，保持电枢电压 $U=U_N$，电枢电流 $I_a=I_N$，磁通 Φ 变化，这时，Φ 与转速 n 的关系为

$$\Phi=\frac{U_N-I_NR_a}{C_e}\times\frac{1}{n}$$

式中 C_e 为电动势常数；R_a 为电枢电阻。

电动机最大允许电磁转矩为

$$T=C_T\Phi I_N=\frac{C_T(U_N-I_NR_a)I_N}{C_e}\times\frac{1}{n}$$

式中 C_T 为转矩常数。上式表明 T 与 n 成反比变化。电动机的电磁转矩比输出转矩多了空载转矩。一般电动机的空载转矩很小。

电动机最大允许电磁功率或最大允许输出功率为

$$P\approx P_M=\frac{Tn}{9550}=\frac{C_T(U_N-I_NR_a)I_N}{9550C_e}\times\frac{1}{n}$$

式中 n 为常数。

可见，直流电动机弱磁调速时，最大允许输出转矩与转速成反比变化，最大允许输出功率为常数，与转速无关，属恒功率调速。

电动机采用恒功率调速时，如果拖动恒功率负载运行，并使其额定功率等于负载要求的功率，则不论运行在什么转速上，电枢电流 $I_a=I_N$ 都不变，电动机得到合理利用，负载的恒功率要求也得到满足。这种恒功率调速与恒功率负载的配合关系称为匹配。如果恒功率调速的电动机拖动恒转矩负载，不能做到匹配。因为这时只能按高速运行转速选配合适的电动机，这时的负载转矩等于电动机的最大允许输出转矩，$I_a=I_N$，电动机得到合理利用。但当运行在低速时，由于负载是恒转矩性质，电动机的电磁转矩也不变，而低速时磁通比高速时数值要大，由 $T=C_T\Phi I_a$ 可知，电枢电流 I_a 变小，即 $I_a<I_N$，电动机不能得到合理利用。

对于风机、泵类负载，既非恒功率类型，也非恒转矩类型。因此，无论采用恒功率调速还是恒转矩调速（见直流电动机恒转矩调速），都不能做到匹配。

zhiliu diandongji hengzhuanju tiaosu

直流电动机恒转矩调速 （speed control of DC motor with constant torque） 在全部调速范围内，直流电动机输出转矩的最大允许值不变的调速方法，又称直流恒转矩调速。为了合理地使用直流电动机，应该使电动机在不同转速下长期运行时，电枢电流 I_a 等于额定电流 I_N 不变。（见直流电动机恒功率调速）

直流电动机恒转矩调速包括直流电动机调压调速和直流电动机电枢串电阻调速两种。

直流电动机的电磁转矩公式为 $T=K_TI_a\Phi$，式中转矩常数 $K_T=K_e/1.03$，K_e 为电动势常数，Φ 为磁通，I_a 为电枢电流。在调压调速及电枢串电阻调速中，Φ 为常值（通常为额定磁通 Φ_N），I_a 受电动机发热的限制，长期工作电流的最大值为额定电流 I_N，也为常值。因此，直流电动机调压调速和电枢串电阻调速时，其最大允许电磁转矩 $T=C_T\Phi_NI_N$ 为常值。电动机的电磁转矩与输出转矩相比，相差的值为空载转矩，一般空载转矩很小，当电磁转矩为恒值时，输出转矩也近似为恒值。所以，调压调速和电枢串电阻调速均属恒转矩调速。人们通常所称的恒转矩调速常常是指被广泛应用的直流电动机调压调速。恒转矩调速是用来表征电动机采用这种调速方法时的带负载能力，并不是指电动机的实际负载转矩为恒值。

电动机采用恒转矩调速时，如果拖动恒转矩负载运行，并使其额定转矩等于负载转矩，则不论运行在什么转速上，电枢电流 $I_a=I_N$ 都不变，电动机得到合理利用，负载的恒转矩要求也得到满足。这种恒转矩调速与恒转矩负载的配合关系称为匹配。如果恒转矩调速的电动机拖动恒功率负载，不能做到匹配。因为这时只能按低速运行转速选配合适的电动机，这时的负载转矩等于电动机的最大允许输出转矩或最大允许电磁转矩，$I_a=I_N$，电动机得到合理利用。但当运行在高速时，由于负载是恒功率性质，高速时转矩小，低于最大允许输出转矩，而恒转矩调速时磁通 Φ（通常为额定磁通 Φ_N）不变，由 $T=C_T\Phi I_a$ 可知，T 减小，I_a 也必然减小，即 $I_a<I_N$，电动机不能得到合理利用。

对于风机、泵类负载，既非恒转矩类型，也非恒功率类型。因此，无论采用恒转矩调速还是恒功率调速，都不能做到匹配。

zhiliu diandongji qidong

直流电动机起动 （startup of DC motor） 直流电动机从静止状态加速到工作转速的整个过程。它包括通电、最初起动和加速过程。（见电动机起动）

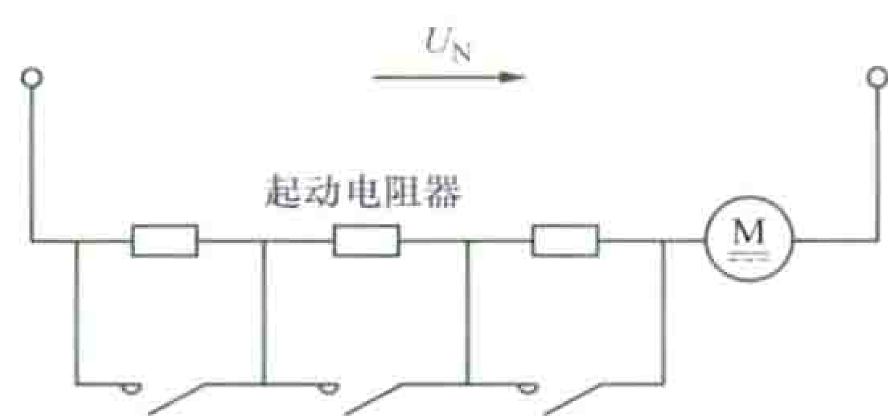
由于直流电动机的电枢回路电感较小，而转动体具有一定的机械惯性，因此，当电动机接通电源后，电磁过渡过程比机械过渡过程要快得多，起动开始阶段转速及相应的电枢电动势都较小，如果电枢回路总电阻也很小，会导致起动电流很大，造成换向困难，并产生强烈的火花甚至环火，从而使传动机构受到机械冲击。如果电枢回路总电阻过大，又会使电磁转矩 T 减小，延长了起动时间。

直流电动机起动方法有直接起动、电枢串电阻起动和降低电源电压起动。

直接起动 把直流电动机直接接到额定电压的电源进行的起动。由于直流电动机的电枢电阻很小，直接起动时，会使最初起动电流很大，可达额定电流的十几倍甚至几十倍。这样大的电流，对电动机的换向和机械性能都很不利，所以一般不直接起动，只有容量很小的直流电动机，由于它的电枢电阻较大，转动惯量较小，才允许直接起动。一般直流电动机的最大允许电流受换向最大允许电流的限制，为额定电流的 2～2.5 倍，故不能直接起动，必须把起动电流限制在允许范围之内。

电枢串电阻起动 为了限制起动电流，在电枢回路里串入专门设计的起动电阻，其原理接线如图所示。在起动过程中，随着转速的上升，电枢电流减小，产生的电磁转矩随之减小，转子加速缓慢下来，这样势必延长了起动时间。如果

要求缩短起动时间，可以分几级切除起动电阻，使起动电流限制在某一允许值以内。起动完成后，起动电阻全部切除。电枢串电阻起动所需设备简单，操作维修方便，广泛应用于各种中小型直流电动机中。但由于起动过程中能量消耗大，不适用于经常起动的电动机和中、大型直流电动机。



直流电动机电枢串电阻起动

降低电源电压起动　直流电动机电枢由可调压直流电源（专用直流发电机或晶闸管整流器）供电。起动时，调节电源电压从低逐渐升高至额定电压。如果采用调节器自动调节电源电压，使电枢电流在起动过程中始终保持最大允许值，则可缩短直流电动机的起动时间。降低电源电压起动在起动过程中能量损耗小，起动平稳，便于实现自动化，还能实现降压调速，应用于容量较大和起动比较频繁的直流电动机中。降低电源电压起动所需电源设备比较复杂，初投资较高。

zhiliu diandongji tiaoci tiaosu

直流电动机调磁调速

（speed control of DC motor by changing the field current）　改变直流电动机励磁电流实现直流电动机调速的技术，又称直流调磁调速。它是一种较为简单、经济，容易实现无级控制的调速方法。

为了充分利用直流电动机的容量，励磁电流一般为额定值，即电动机处于满磁状态下运行。因此，调节励磁实际上只能从额定励磁往减弱励磁方向进行，所以又被称为弱磁调速。此调速法能在额定励磁下，通过升高电枢电压到额定值（见图 1 中的 U 线）而使电动机转速提高到基速（调压调速的最高转速）的基础上，再减弱励磁，提高转速，见图 1 中的曲线 Φ。随着转速的增高，整流条件变差，电枢电流的允许值相应降低。电枢电流与电枢的机械强度是限制直流电动机弱磁调速上限的两大因素。此外，励磁减弱过多，还可能使直流电动机转速进入失去控制状态，见图 2 中的曲线 Φ_4。

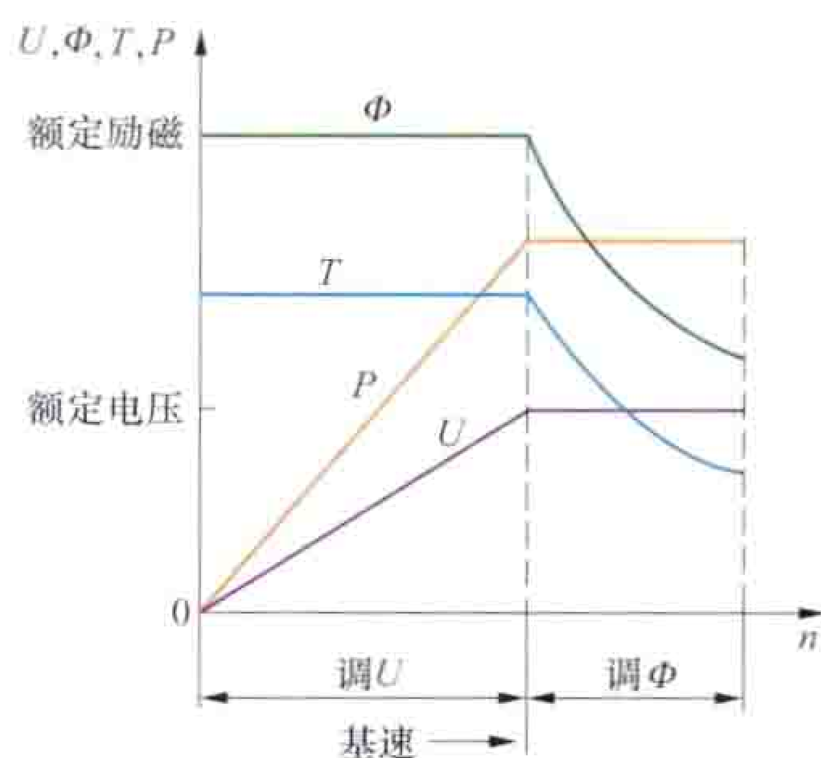


图 1　直流电动机调压和调磁时的调速特性

无换向极电动机的调速幅度为 1.5～2 倍；有换向极的电动机为 3～4 倍；有补偿绕组的电动机为 4～5 倍。在调磁调速的整个范围内，随着转速上升，允许输出转矩相应减小（见图 2 中虚线），大体上保持转速乘转矩等于常数，即输出功率等于常数（见图 1 中曲线 P），所以调磁调速又被称为直流电动机恒功率调速。

图 2　他励直流电动机调磁调速特性曲线

从图 2 可见，电动机的励磁愈弱，相同的负载变动时其转速变化也愈大。

由于直流电动机励磁回路的时间常数远大于电枢回路的时间常数，因此，直流电动机调磁调速的反应速度也就不如直流电动机调压调速。直流电动机调磁调速适用于对反应速度要求不高、要求电动机能在基速以上以及恒功率控制的场合，如纸张、带材等加工机械的卷筒恒张力控制等。调磁调速也可与调压调速相结合，构成调压调磁调速。（见直流电动机调压调磁调速）

zhiliu diandongji tiaosu

直流电动机调速

（speed control of DC motor）　按照被拖动机械设备的工况需要，对拖动该设备的直流电动机转速进行控制的技术，又称直流调速。直流电动机调速具有转矩和磁链相互解耦、调速性能良好等优势，因此传统上通常用于调速精度要求较高的场合。

原理和分类　直流电动机机械特性方程式为

$$n=\frac{U}{K_e\Phi}-\frac{R_a+R_q}{K_eK_T\Phi^2}T$$

式中 n 为电动机转速；U 为直流电动机电枢端电压；T 为电磁转矩；R_a 为电枢电阻；R_q 为电枢回路串入电阻；K_e 为电动机电动势常数；K_T 为电动机转矩常数；Φ 为磁通。由式可见，只要改变电枢端电压 U、电枢回路串入电阻 R_q 或磁通 Φ 中的任何一个或两个参量，都可以调节直流电动机的转速。

直流电动机调速可按调节参量的不同分类如下：



直流电动机电枢串电阻调速　在一定的负载条件下，增减电枢回路中串入的电阻值，可相应地实现降低或升高转速。电枢回路中串入的电阻值愈大，当负载增大时转速下降幅度也愈大。该调速方法在轻负载条件下难以达到低速，且效率低，多用于调速要求不高、电动机容量不大、短时工作制或有软转速-转矩特性要求的场合。使用电枢串电阻调速，并不改变电动机的最大允许输出转矩，所以该调速法也是直流电动机恒转矩调速的一种。（见直流电动机电枢串电阻调速）

直流电动机调压调速　在电枢电压可调的条件下，调节直流电动机的电枢电压，可以实现直流电动机的四象限运行。调压调速具有负载变化时速度稳定性好、响应快、调速范围宽等优点，是调速性能较高的直流电动机调速方法。（见直流电动机调压调速）

直流电动机调磁调速　在电枢电压恒定条件下，通过调节电动机的励磁电流来实现调速的方法。（见直流电动机调磁调速）

直流电动机调压调磁调速　为了经济而又充分地使用直流电动机，对于只在低速段要求拖动转矩大，而在电动机额定转速以上则允许拖动转矩随转速升高而下降（如轧钢机、航空发电机恒速装置试验设备等），大体上符合转矩乘转速等于常数规律的负载，可将整个调速范围分成调电动机电枢电压段和调电动机励磁电流段，中间平滑过渡，这就是直流电动机的先调压后调磁的调速控制。与单纯使用调压调速相比，可成倍地减轻所选用的电动机质量。根据其调磁控制依附于电枢电压方式的不同，又被分成独立控制调压调磁直流调速和非独立控制调压调磁直流调速。（见直流电动机调压调磁调速）

调速系统　直流电动机的调速系统可分为单闭环调速系统和多闭环调速系统。

单闭环调速系统　如果直流调速采用开环系统，即不加任何反馈量，负载电流、电源电压等变化将引起转速的波动，使电动机转速与其给定值之间产生偏差。为了减少这种偏差，构成引入转速负反馈的单闭环调速系统，如图1所示，按转速给定信号与反馈信号的偏差信号对电动机进行控制，使电动机能稳定在给定转速下运行，使调速系统的静态指标大大提高。如调速系统采用PI（比例积分）调节器，不但可以提高静态特性，还可以保证动态稳定性。

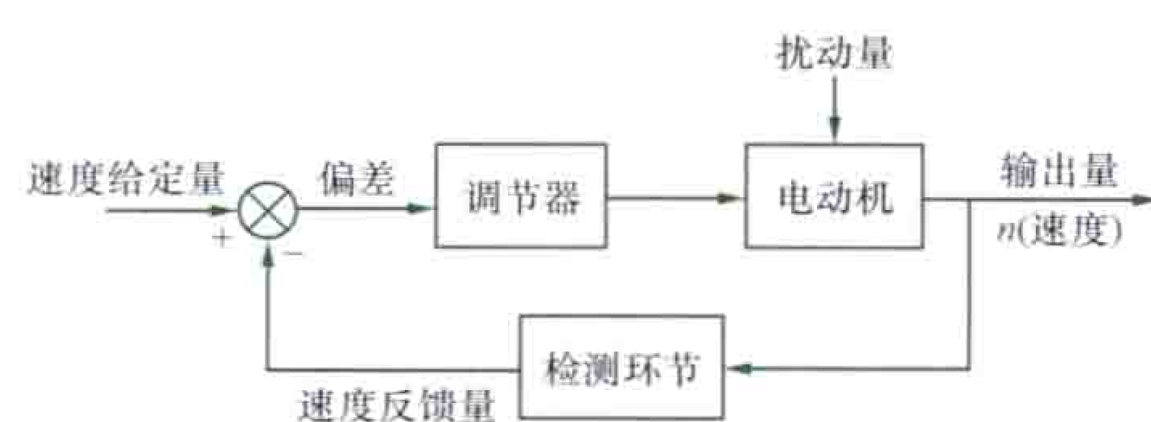


图1　单闭环调速系统原理框图

多闭环调速系统　许多生产机械需要经常工作在起动、制动、反转等过渡过程中，因而需要通过调节电流来实现转矩控制，以获得良好的动态调速性能。单闭环调速系统不能起到在过渡过程中控制电流的作用，因而高性能调速系统要求具有电流调节环节，这样就构成了具有转速和电流负反馈的转速、电流双闭环调速系统，电流环为内环，转速环为外环。图2（a）所示为双闭环晶闸管不可逆直流调速系统的原理框图，其静态特性如图2（b）所示。在正常负载时，依靠速度调节器ST的调节作用，保证系统具有无静差的硬特性（近似地认为），这时电流调节器LT只起辅助调节作用；当电动机负载转矩过大时，ST输出进入饱和而失去调节作用，它仅为电流环提供一个最大电流给定值I_{dm}，在LT的作用下，系统处于恒流调节状态运行。如起动过程中，ST在大部分时间内处于饱和状态，只有当转速超调后才退出饱和，从而保证整个起动过程中电流为最大，加快了起动过程。双闭环调速系统中，内环的响应速度比外环快得多，对于内环中的扰动量可即时抑制，提高了整个系统的抗扰动能力。除转速、电流双闭环调速系统外，还可构成电动势、电流双闭环调速系统或三闭环调速系统。

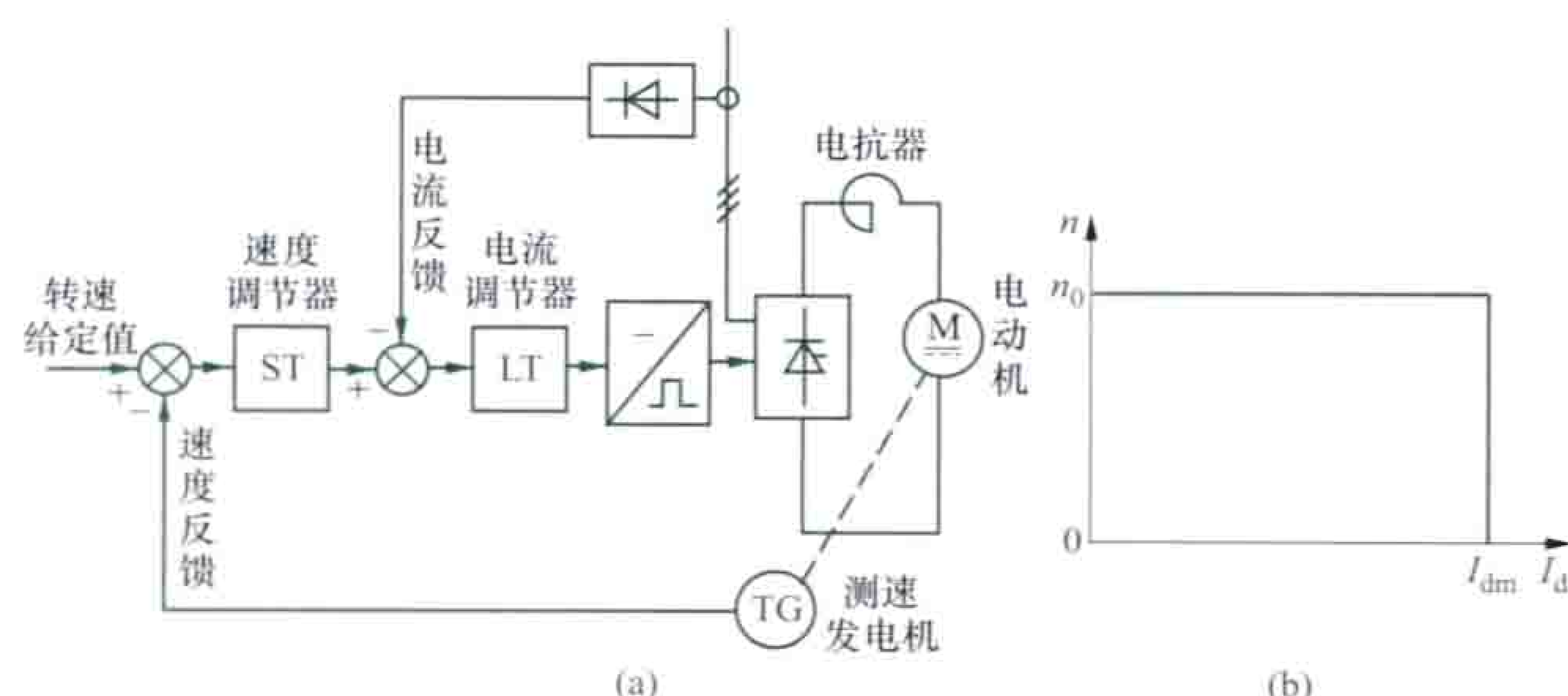


图2　双闭环晶闸管不可逆直流调速系统
（a）原理框图；（b）静态特性

简史　自从19世纪70年代出现直流电动机之后，最初通过调节直流电动机的励磁进行调速。到19世纪末，开始使用调节直流电动机电枢电压的调速方法。20世纪30年代以前，使用没有中间放大环节的直流电动机调速。40年代以后，随着电机扩大机及以后的电子管放大器、磁放大器、离子器件和半导体器件在电动机调速领域的出现，直流调速系统采用了中间放大环节和反馈控制，性能明显提高。直流调速系统的稳速精度可达数十万分之一；调速比可达数万比一；晶闸管相位控制直流调速的转矩响应时间可小于20ms，当采用了开关型晶体管变换器和特种直流电动机后，电流环的响应时间可缩短到1～2ms。70年代以前，调速性能要求较高的机械设备，大都采用直流电动机调速，交流电动机调速主要用在对调速性能要求不高，或直流电动机不能胜任的场合（如有超高速要求，有防爆以及特大容量等特殊要求的场合）。70年代之后，随着交流电动机高性能控制技术（矢量控制、直接转矩控制）的快速发展，直流电动机调速已逐渐被交流电动机调速所取代，仅在部分小容量场合仍有应用。

参考书目

陈伯时，阮毅．电力拖动自动控制系统——运动控制系统．北京：机械工业出版社，2003.

李发海，王岩．电机与拖动基础．4版．北京：清华大学出版社，2012.

zhiliu diandongji tiaoya tiaoci tiaosu

直流电动机调压调磁调速

（speed control of DC motor by changing the armature voltage and the field current）　通过调节直流电动机电枢回路电压和励磁回路电流来实现直流电动机调速的技术。为了经济而又充分地使用直流电动机，对于只在低速段要求拖动转矩大，而在基速以上则允许拖动转矩（T）随转速（n）升高而下降（如轧钢机、航空发电机恒速装置试验设备等），大体上符合转矩乘转速等于常数规律的负载，可将整个调速范围分成调节电动机电枢电压段和调节电动机励磁电流段，中间平滑过渡，这就是直流电动机先调压后调磁的调速控制（图1中曲线ab及bc）。根据其调磁控制依附于电枢电压方式的不同，又被分成独立控制调压调磁直流调速和非独立控制调压调磁直流调速。它们的区别主要在给定部分，两者均适用于调速精度要求不高的场合，如单机架初轧机、轧机的某些辅助传动装置等。

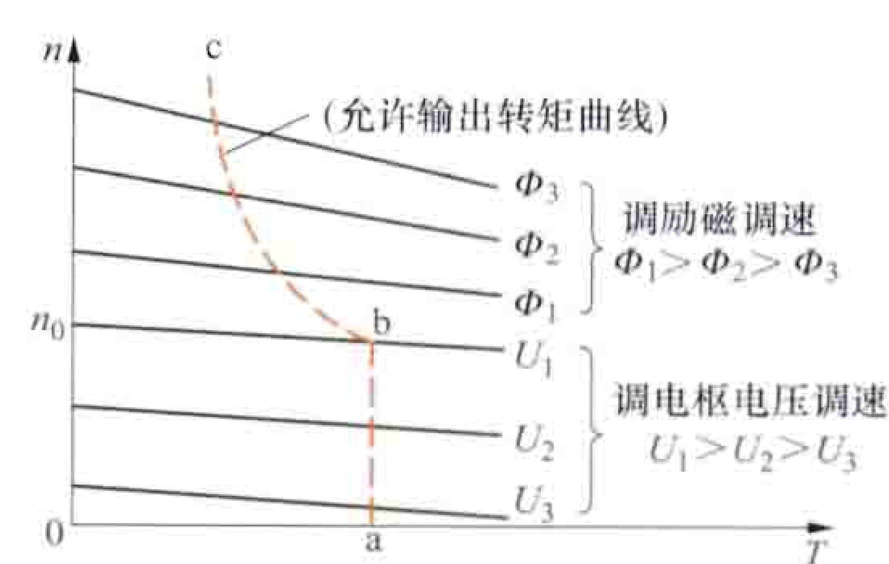


图1　他励直流电动机的调压调磁特性

独立控制调压调磁直流调速　通过各自独立的给定信号

分别调节直流电动机电枢回路电压和励磁回路电流以实现直流电动机调速。20 世纪 40 年代以前，调压调磁直流调速一般由直流发电机供电，采用继电器、接触器相应地切换直流发电机和直流电动机励磁回路的电阻进行控制。60 年代起，由晶闸管装置供电的独立控制调压调磁调速系统广泛投入应用，其调压和调磁是完全独立的两条通道。调压通道采用电压闭环反馈控制，调压信号恒定时，能维持电枢电压恒定；调磁通道采用电流闭环反馈控制，调磁信号恒定时，能维持励磁电流恒定。但随着斩波控制直流调速技术的发展，调压调磁调速的应用已经很少。

调磁的目的是将电动机转速提高至基速以上工作（见直流电动机调磁调速），扩大调速范围。相同转矩下减弱励磁后，电枢电流要增加，损耗也增大，因此除非调压调速范围已不能满足要求，否则不宜采用调磁调速。合理的调压调磁调速，应先在满磁状态下调电枢电压，电压升至额定值后，再调励磁。这样，直流电动机的容量能得到较充分的利用。升速过程的先升压后弱磁，降速过程的先增磁后降压的先后程序，可由检测设备进行控制。例如，升速时先调电压，待电压升至额定值后，由电压检测元件（如电压继电器）发出信号，才允许在维持电枢电压为额定值下，再减弱励磁升速至基速以上工作。

在独立控制调压调磁直流调速系统中，电压升到额定值后，电压不能再升高，调压信号维持不变，因此，不能克服电枢压降引起的转速降，但不需要测速机，可免除安装维护上的麻烦。

也有人主张将电动机的励磁电流直接受速度给定环节的控制而不直接受控于电动机电枢电压（或电动势）的直流调压调磁调速称为独立控制调压调磁直流调速。

非独立控制调压调磁直流调速　通过同一个给定信号调节直流电动机电枢回路电压和励磁回路电流以实现直流电动机调速。非独立控制调压调磁直流调速时励磁由电枢回路的电动势信号控制，能方便地实现升速过程中先升压后弱磁和降速过程中先增磁后降压的控制顺序。

非独立控制调压调磁直流调速可分为励磁双闭环控制和励磁单闭环控制两种方式。

（1）励磁双闭环控制方式。如图 2 所示，电枢电压由双闭环系统控制，系统中具有包含速度调节器 ST 的速度闭环和电流调节器 LT 的电流闭环。总调速信号 u_{gn} 加在 ST 的输入端。励磁电流也由双闭环系统控制，系统中电动势调节器 ET 和励磁电流调节器 LLT 构成双闭环。由于调磁调速过程实为电动势恒值调节过程，所以励磁控制系统中把电动势调节环放在外环。

图 2　非独立控制调压调磁调速系统示意图
LLT—励磁电流调节器；ST—速度调节器；LT—电流调节器；EY—电动势运算器；ET—电动势调节器；LQ—励磁线圈；TG—测速发电机；α_1—电压变换系数；α_2—转速变换系数；β_1—电枢电流变换系数；β_2—励磁电流变换系数

基速（调压调速的最高转速）以下调速过程中，电动势运算器 EY 输出的电动势反馈信号 u_{fe} 小于基速电动势给定信号 u_{ge}，电动势调节器 ET 处于饱和状态，其限幅值即为满磁给定值，使直流电动机保持在满磁状态下运行。因此，基速以下是双闭环控制的调压调速系统。

一般当转速升至额定转速的 95%，即确定为基速以上升速过程，取此时的电动势反馈信号 $u_{fe}=u_{ge}$，ET 开始退出饱和。转速再升高，电动势 E 增大，便出现 $u_{fe}>u_{ge}$，ET 输出下降，使励磁电流减少，磁通 Φ 减弱。随着 Φ 下降，电动势 E 又逐渐恢复原值。若 ET 为比例调节器，调速至最高转速时，电动势 E 可上升至额定电动势值。若 ET 和 LLT 采用比例积分（PI）调节器，可实现电动势和励磁电流的无静差调节。调磁开始点的电动势值取为额定电动势值，可得到电动机转速达到基速后才开始弱磁升速的调磁调速过程，这就提供了充分利用电动机容量的条件，但同时也提高了技术难度。

基速以上减速，可降低转速给定值 u_{gn}，使 $u_{gn}<u_{fn}$，在 ST、LT 的作用下，整流电压下降，电动机降速，电动势 E 下降，致使 $u_{fe}<u_{ge}$，ET 输出增大，使励磁电流和磁通增加，随之 E 回升趋向原值。这一过程直至转速降到新的给定值，整流电压又大于电动势，电枢回路建立起负载电流，运行速度才趋于稳定。由此可见，基速以上的降速过程也是电动势的恒值调节过程。转速降至基速以下，$u_{ge}>u_{fe}$，ET 进入饱和状态，电动机励磁增至满磁，系统进入降压降速过程。

由于基速以上调速过程中，电动势基本不变，电枢电压变化很小，所以这种调速系统的主反馈必须采用转速反馈，以使 ST 输入端的速度给定信号 u_{gn} 能始终与转速反馈信号相比较。采用转速反馈控制，能获得比电压反馈控制更高的调速精度。非独立控制调压调磁直流调速（双闭环励磁控制）系统调节方便，结构比较合理，励磁电流反馈始终起作用，可对励磁回路的大时间常数进行补偿，动态性能较好，广泛应用于各种调速系统，如冷、热连轧机传动，可逆冷、热轧机主传动。

（2）励磁单闭环控制方式。图 3 所示是采用最大值选择器的非独立控制调压调磁直流调速系统。电动势调节和励磁调节共用一个调节器，用一个最大值选择器把电动势反馈与励磁电流反馈作用分开。最大值选择器由二极管 VD1、VD2 构成，同时送来

图 3　采用最大值选择器的非独立控制调压调磁直流调速系统示意图
U_a—电枢电压；I_a—电枢电流；EY—电动势运算器；LLT—励磁电流调节器；LQ—励磁线圈

的两个反馈信号通过二极管进行比较，只有较大的一个信号能送入励磁电流调节器 LLT。转速在基速以下时，$u_{fl}>u_{fe}$，VD1 导通，VD2 截止，励磁电流反馈构成闭环调节，维持励磁电流恒定。转速高于基速时，$u_{fe}>u_{fl}$，VD2 导通，VD1 截止，电动势反馈起作用，转速升高，励磁电流下降，维持电动势恒定。这种系统工作原理与双闭环系统基本相似，只是省了电动势调节器 ET，是一个单闭环励磁控制系统。

zhiliu diandongji tiaoya tiaosu

直流电动机调压调速 （speed control of DC motor by changing the armature voltage） 通过改变直流电动机电枢电压实现直流电动机调速的技术。各种直流电动机都可以通过改变电枢电压来调速。

他励直流电动机调压调速时的机械特性如图 1 所示。图 1 中 n 为电枢电压为额定值 U_N 时的转速，当负载一定时，随着电枢电压的降低（$U_N>U_1>U_2>U_3$），直流电动机转速也降低（$n>n_1>n_2>n_3$）。

直流电动机调压调速具有负载变化时速度稳定性好、响应快、调速范围宽等优点，当电源电压连续可调时，能实现无级调速。这种方法是调速性能较好的直流电动机调速方法。

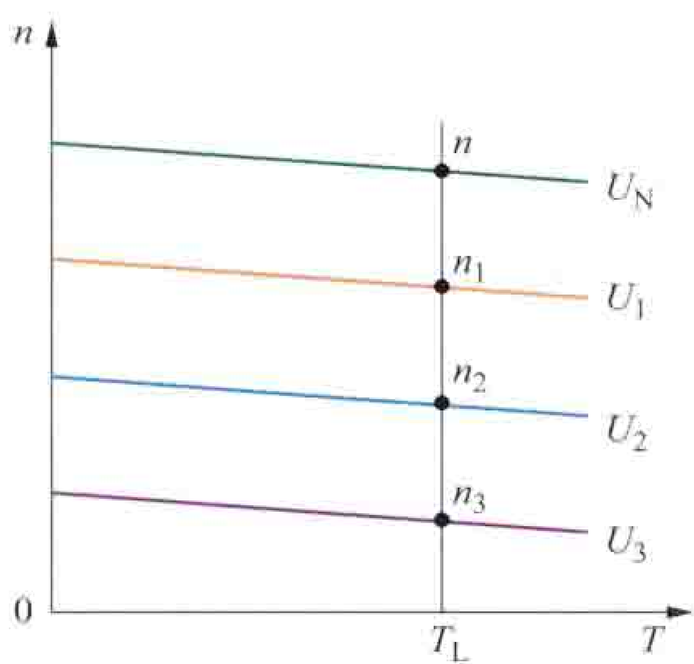


图 1 他励直流电动机调压调速时的机械特性

直流电动机调压调速可采用电枢串并联调速、电枢串联升压发电机调速、汞弧整流器直流调速、电动发电机组直流调速、电机扩大机直流调速、磁放大器直流调速、晶闸管相位控制直流调速和斩波控制直流调速。其中应用较多且调速性能较高的是晶闸管相位控制直流调速和斩波控制直流调速，而电动发电机组直流调速、电机扩大机直流调速、磁放大器直流调速、汞弧整流器直流调速已很少使用。

直流电动机电枢串并联调速 某机械由 N 台等转速的直流电动机拖动，这些直流电动机的规格相同，它们的轴与轴之间又有足够牢固的机械联系，则可将这些直流电动机的电枢加以串联，并串入起动电阻，再接到恒定直流电源电压 U 上。起动时逐步减少起动电阻阻值，直到完全切除。这样，每台电动机受到的电压为 U/N。改变串联的电动机数，使之相应转入并联支路，即可实现有级调速。此法特点为线路简单、节能，多用于电力机车调速。

直流电动机电枢串联升压发电机调速 将直流电动机电枢与直流发电机电枢串接，再接到共用直流电源（见图 2），则电动机电枢的电压等于共用电源电压加（或减）被串接的直流发电机端电压。调节共用电源电压或串接的直流发电机（又称升压发电机）的电压均可调节电动机的电枢电压，实现各电动机的单独调速。升压发电机的额定电压通常比被其控制的拖动电动机小，但额定电流值相近，升压发电机的控制功率也较小，且反应快。此法在大部分场合已被交流调整方法取代。

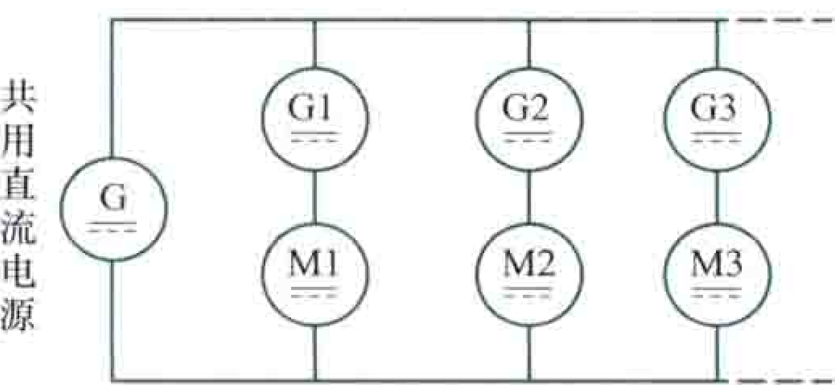


图 2 直流电动机电枢串接升压发电机调速典型线路

晶闸管相位控制直流调速 通过控制晶闸管整流装置的触发脉冲相位，把交流电压变换为可调的直流电压，实现直流电动机调速的技术。

斩波控制直流调速 又称脉冲控制直流调速。对电动机直流电源或恒压直流电源采用斩波器控制，使其做周期性重复接通和开断，与此同时，按要求改变其接通持续时间与断开持续时间的比例，从而调节供电电压的平均值，使直流电动机实现调速。斩波控制直流调速具有节约能源、调速平滑、调速范围宽，并能快速响应和再生制动等优点，适用于城市无轨电车、电力机车、蓄电池车和潜艇等。

zhiliu diandongji zhidong

直流电动机制动 （braking of DC motor） 将直流电动机电磁转矩的方向改变为与转子转向相反，以实现电动机的停转或限速。制动的目的是使直流电动机转子尽快停转或由高速迅速转为低速或限制位能性负载的下降速度。直流电动机的制动可分为能耗制动、反接制动和回馈制动 3 种。

能耗制动 将直流电动机运行时的动能消耗在外加电阻上，使其转子很快停止运转。能耗制动的特点是操作简便，制动转矩可以调节，使生产机械准确地停在某一位置；低速时，制动转矩小，拖长了制动时间。为了使电动机更快地停转，可在低速时再加上机械制动。能耗制动方法依被制动直流电动机是他励还是串励而有所不同。

他励直流电动机能耗制动 设原先处于电动运行状态，制动时保持励磁不变，将电枢两端从电源断开，并立即接到一制动电阻上，此时电动机由生产机械的惯性转矩拖动而发电，将生产机械储存的动能转换成电能消耗在电枢回路电阻上，直到电动机停转。制动电阻愈小，制动电流和制动转矩愈大。他励直流电动机能耗制动的机械特性如图 1 所示，改变制动电阻 R_z 的大小，可得到不同斜率的机械特性。为了避免过大的制动电流带来的不利影响，通常限制最大制动电流不超过 2～2.5 倍额定电流。

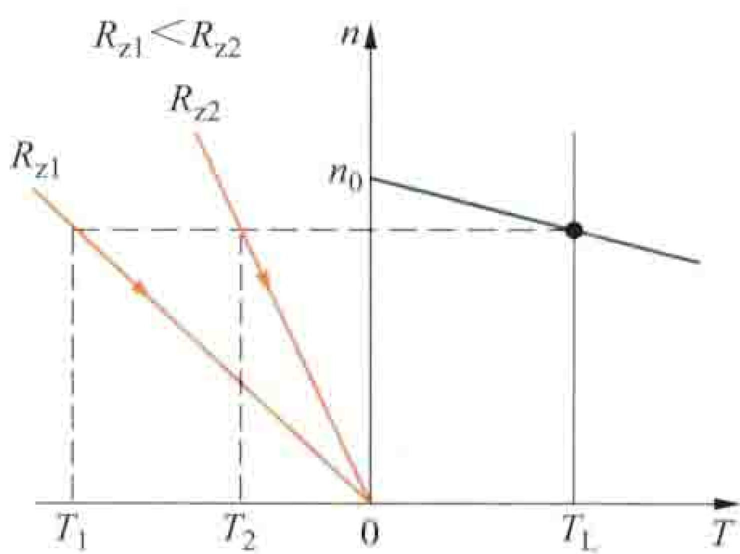


图 1 他励直流电动机能耗制动的机械特性

串励直流电动机能耗制动 又可分为他励式串励直流电动机能耗制动和自励式串励直流电动机能耗制动两种。他励式串励直流电动机能耗制动时，只把电枢脱离电源接到制动电阻上，而把串励绕组接在电源上成为一台他励发电机，从而产生制动转矩。由于串励绕组电阻很小，必须在励磁回路串入限流电阻。他励式串励直流电动机能耗制动效果好，应用较广泛。自励式串励直流电动机能耗制动时，将电枢和串励绕组脱离电源后，一起接到制动电阻上，依靠电动机剩磁自励，成为串励发电机，从而产生制动转矩。为了使制动时的电流产生的磁通与剩磁方向一致，制动时必须将励磁绕组反接。自励式串励直流电动机能耗制动，开始时制动转矩大，随着转速的下降，电枢电动势和电流也下降，同时磁通

也减小，使制动转矩很快下降，制动效果变差，但这种方法无需其他电源。

反接制动 反接制动可分为电枢反接制动和转速反向的反接制动。

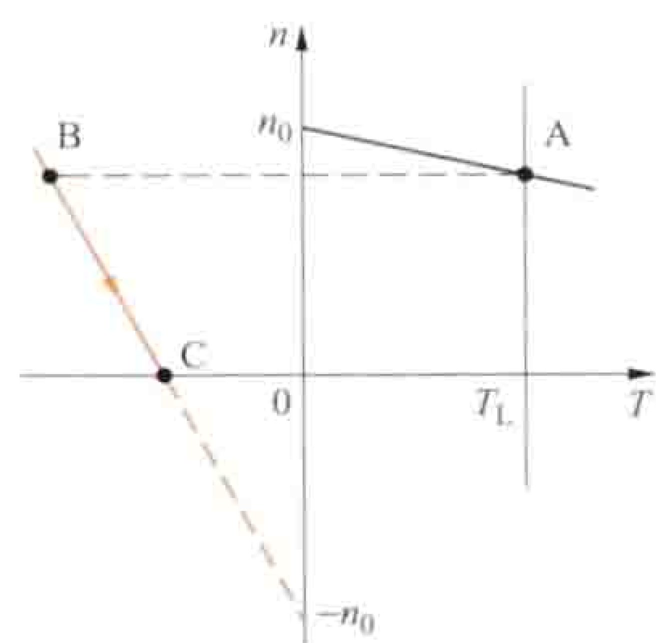


图 2 他励直流电动机电枢反接制动的机械特性

电枢反接制动 他励直流电动机电枢反接制动时，应保持励磁电流不变，改变电枢两端外施电压的极性，使电压与电动势同方向，从而改变电枢电流和电磁转矩的方向，使电动机迅速减速直到停转。一旦电动机停转，应立即断开电源，否则电动机将反向起动。其机械特性如图 2 所示。为了限制反接制动电流对电网电压的影响和过大的制动转矩对机械系统的冲击，电枢反接制动时，必须在电枢电路串入附加电阻。串入的阻值，一般应使制动电流小于 2.5 倍额定电流。串励直流电动机电枢反接制动时，应注意只改变电枢两端外施电压的极性，而保持励磁绕组极性不变，以保持电枢电动势的方向不变。

电枢反接制动时制动转矩较大，常用于制动频繁的传动系统中，但制动电流冲击较大，不容易自动停转。

转速反向的反接制动 这种方法适用于带有位能性负载的他励直流电动机和串励直流电动机。位能性负载，如起重机提升与放下重物这类负载，不论运动方向如何，重力作用总是向下的，重力转矩的方向也总是不变的。制动时，在电枢回路串入较大的电阻，使电动机反转。由于电枢电流和磁通未改变方向，所以电磁转矩方向不变，它对转子起制动作用。由于是负载拉着电动机运行，所以又称倒拉反转制动。图 3 所示为他励直流电动机转速反向的反接制动机械特性。实际应用中，都是从转子静止开始的，即串入电阻后再加电枢电压。

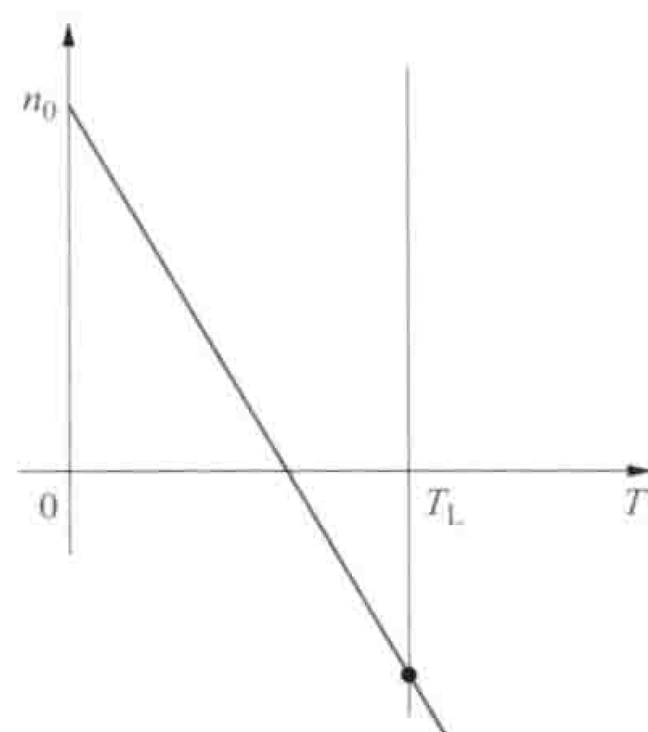


图 3 他励直流电动机转速反向的反接制动机械特性

回馈制动 又称再生制动。电动机在电动状态运行中，由于某种因素，如降低电动机端电压，使电动机转速高于理想空载转速时，电动机便处于回馈制动状态。此时由于电枢电动势高于电源电压，电动机作为发电机运行，电流改变了方向，电磁转矩成为制动转矩。回馈制动过程中，将机组的动能转变成电能回馈给电网，因此比较经济。这种制动常出现在由直流电动机拖动的电力机车下坡或调压调速过程中。其机械特性如图 4 所示。

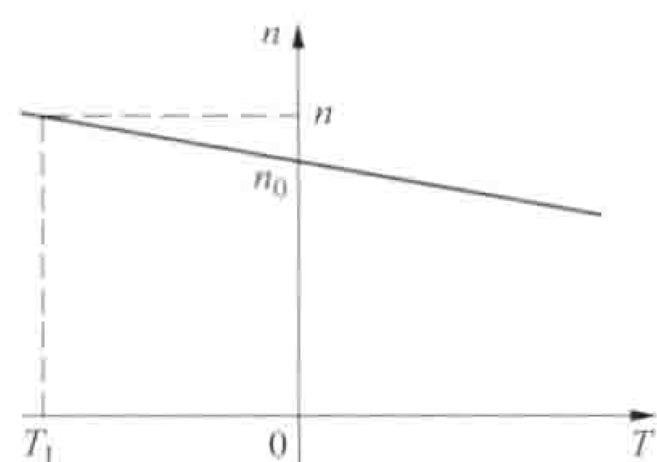


图 4 他励直流电动机回馈制动的机械特性

由于串励直流电动机的理想空载转速为无穷大，所以它不可能采用回馈制动，要实行回馈制动，必须改为他励运行。

zhixian diandongji

直线电动机 (linear motor) 将电能直接转换成直线运动的机械能的电动机。直线电动机（见图）可用来驱动需做直线运动的机械，如机械手、导弹发射装置、液态金属电磁泵、起重吊车、传送带及高速列车等。

基本结构和主要类型 直线电动机的基本结构有静止部分和可动部分，其间有气隙。静止部分称为静子，可动部分称为动子。电动机工作时，静子、动子之间有相对运动，为使两者能够相互作用，两者长度不能做成相等，其中至少有一个长度等于工作所要求的整个行程的长度。可以是短静子长动子，也可以是长静子短动子。


直线电动机

从原理上看，直流电动机、同步电动机和异步电动机都可做成直线电动机。由于异步电动机只需要向静子供电，结构简单、使用方便、运行可靠，实际上大多采用直线异步电动机，只有在总的行程很短时才采用直线同步电动机和直线直流电动机，如在仪器仪表中用的电动机。

直线异步电动机有平面型和管型两种结构形式。平面型直线电动机的静子和动子在气隙中的工作面都是平面，且多做成短静子。动子仅一边有静子的叫单边型直线电动机，两边都有静子的叫双边型直线电动机。管型直线电动机的静子是圆管形，动子是一根厚壁圆钢管。由于其动子完全包在静子中间，所以散热条件较平面型的差。

直线直流电动机由一套磁极和一组绕组构成，分为有刷型和无刷型两种。绕组中的电流通过电刷和换向器引入的，称有刷型直线电动机；直接用导线引入的，称无刷型直线电动机。直线直流电动机从结构上还可分为动极式和动圈式两种。

工作原理 与相应的旋转电动机相似，在电磁力的作用下，动子带动负载移动。在直线异步电动机中，静子多相绕组接上电源后，气隙中产生一个行波气隙磁密，该磁密切割动子的导体，在导体中感应产生电动势及电流，载流导体在磁场中受电磁力，该电磁力推动动子沿行波气隙磁密移动方向移动。在直线直流电动机中，由直流供电，产生的作用力与电枢电流成正比，速度与电枢电压成正比。

特点与应用 直线电动机与旋转电动机相比，主要有如下特点：①具有针对直线运动的工作机构，因无需把旋转运动变成直线运动的附加装置，系统结构更简单，质量和体积大大减小；同时由于消除了运动转换装置等中间环节的死区和误差，定位精度更高。②直线电动机的直线运动加速度极限值远高于旋转电动机，系统反应速度更快、随动性更好。③直线电动机容易做到磁悬浮支撑，使得动子和静子之间始终保持一定的空气隙而不接触，消除了静子、动子间的接触摩擦阻力，实现无接触传递力，大大地提高了系统的灵敏度、快速性和效率，机械摩擦损耗几乎为零，工作安全可靠，寿命长。

直线电动机主要应用于三个方面：①数控机床、加工中心等自动控制系统；②作为长期连续运行的驱动电动机用于

磁悬浮列车、城市轨道交通驱动等场合；③需要短时间、短距离内提供巨大的直线运动能的装置中，如电磁炮、弹射器等。

zhishideng

指示灯 （indicating lamp） 用灯光监视电路和电气设备工作或位置状态的器件。指示灯通常用于反映电路的工作状态（有电或无电）、电气设备的工作状态（运行、停运或试验）和位置状态（闭合或断开）等。

指示灯（见图）由灯头、灯泡、灯罩和连接导线等组成，一般装设在高、低压配电装置的屏、盘、台、柜的面板上，某些低压电气设备、仪器的盘面上和其他比较醒目的位置上。反映设备工作状态的指示灯，通常以红灯亮表示处于运行工作状态，绿灯亮表示处于停运状态，乳白色灯亮表示处于试验状态；反映设备位置状态的指示灯，通常以灯亮表示设备带电，灯灭表示设备失电；反映电路工作状态的指示灯，通常红灯亮表示带电，绿灯亮表示无电。为避免误判断，运行中要经常或定期检查灯泡的完好情况。



带按钮的指示灯

指示灯的额定工作电压有220，110，48，36，24，6，3V等。受控制电路通过电流大小的限制，同时也为了延长灯泡的使用寿命，常在灯泡前加一限流电阻或用两只灯泡串联使用，以降低工作电压。

zhishi yibiao

指示仪表 （indicating meter） 在低压配电装置中用来显示被监测电路中各种电气参数的仪器。常用的指示仪表有电压表（见图1）、电流表（见图2）、功率表、功率因数表、频率表以及电能表等，一般为指针型直读式仪表，其外形结构多为板式和槽形。这些仪表通常由测量机构（表头）和必要的辅助器件组成。测量时将仪表接入被测电路中，通过仪表的测量机构把被测量转换为可动部分的机械偏转角，借助指针显示出被测电气量的数值。



图1　电压表



图2　电流表

分类　根据工作原理可将指示仪表分为：①磁电式仪表，主要用于测量直流电压、直流电流等；②电磁式仪表，主要用于测量交流电压、交流电流等；③电动式仪表，主要用于测量功率等。除此之外，还有整流式仪表、感应式仪表、静电式仪表及数字式仪表等，均被广泛用于电气监控和调试测量。

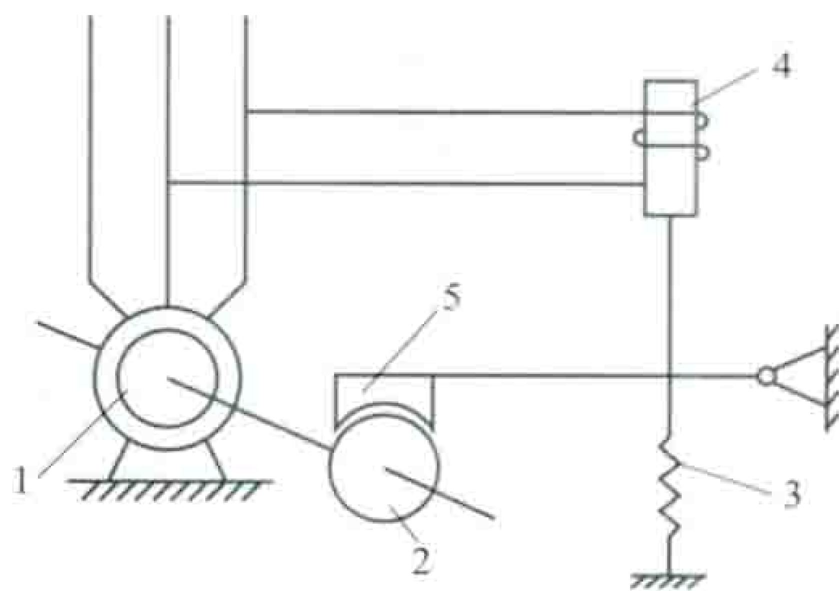
测量接线　若测电流量需把电流表串联接于被测电路中；若测电压量应把电压表与被测电路并联，即把电压表连接到被测电路的两端；功率表用来测量电路中通过的或负荷消耗的功率大小，功率与电压和电流两个量值有关，所以测量功率时功率表的电流线圈串联接于电路，电压线圈并联接于电路。当用配电装置指示仪表测量高电压（大于500V）、大电流（大于50A）时，可借助辅助设备和器件扩大量程。如测量交流高电压时采用电压互感器，其一次侧并接于主电路，二次侧并接一块交流电压表；测交流大电流时，则把电流互感器一次侧串接于主电路，二次侧串接一块交流电流表；测量直流电压和电流时，则通过倍压器和分流器来改变量程。采用辅助设备和器件改变量程后指示仪表测得的电气量值为一次主电路的量值。

基本技术要求　包括：①足够的准确度。指示仪表按基本误差分为0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，5.0七个等级，基本误差等级愈小，准确度愈高。低压配电装置指示仪表除计量仪表，如有功电能表、无功电能表选用0.5级外，其他用作测量的仪表均可选用1.0级和1.5级。②相应的灵敏度。灵敏度是指仪表对被测量最小值的反应能力。仪表灵敏度过低，不能反应被测量的微小变化，灵敏度过高则仪表量限可能过小。③仪表本身损耗应尽可能小。④便于读数。用于测量直流的仪表一般为均匀标度，而测量交流用的仪表大多为不均匀量程标度，要求其刻度盘上工作部分宽度不应小于标尺全长的85%。⑤良好的阻尼装置。为了便于迅速读数，一般阻尼时间应不超过4s。⑥足够的绝缘强度和过载能力。

zhidongqi

制动器 （brake） 在机械或电气传动装置中用作机械制动的电器。它能使传动设备准确地减速或停车。制动器按机械结构可分为块式和带式制动器；按驱动方式可分为电磁式和液压式制动器；按电源性质可分为交流和直流制动器。

块式制动器　又称弹簧抱闸。它由制动瓦块、弹簧、电磁铁及其他机械传动机构组成，其工作原理如图所示。电动机通电时，电磁铁也通电，其衔铁克服弹簧的拉力向上运动，使制动瓦块离开制动轮而松闸。电动机断电时，电磁铁因同时失电而释放衔铁，在弹簧作用下，制动瓦块迅速向下运动，从而压紧制动轮使电动机制动。块式制动器结构简单，适用于中、小型机械的制动。



块式制动器工作原理图

1—电动机；2—制动轮；3—制动弹簧；4—制动电磁铁；5—制动瓦块

带式制动器　又称皮带抱闸。其动作过程与块式制动器相似，所不同的是它用收紧皮带的方法进行制动。一般带式制动器产生的制动力矩较大，所占空间也大，故多用于大、

中型机械的制动。

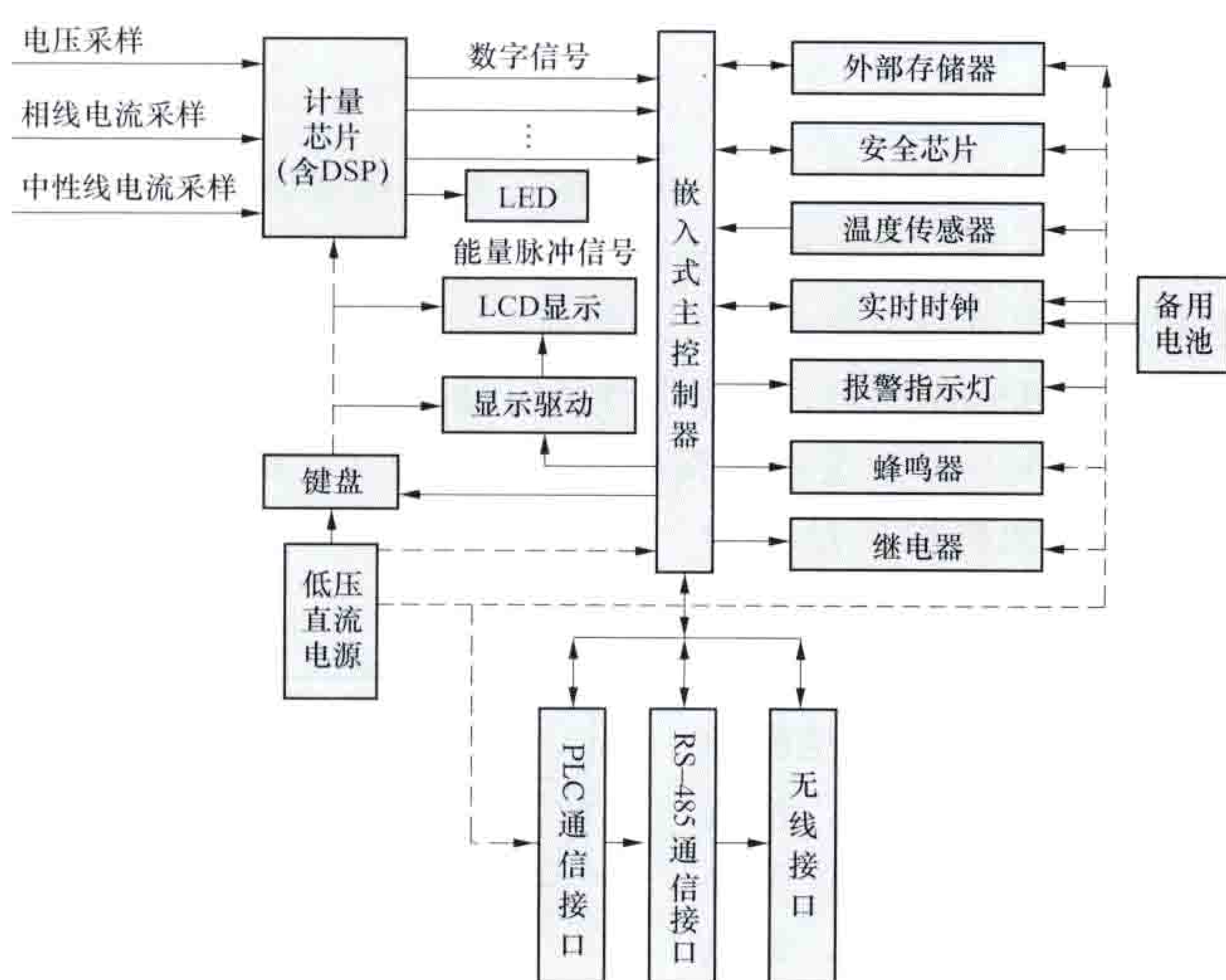
电磁制动器　利用电磁效应实现制动的制动器。分为电磁粉末制动器和电磁涡流制动器两种形式。①电磁粉末制动器。励磁线圈通电时形成磁场，磁粉在磁场作用下磁化，形成磁粉链，并在固定的导磁体与转子间聚合，靠磁粉的结合力和摩擦力实现制动。励磁电流消失时磁粉处于自由松散状态，制动作用解除。这种制动器体积小，质量轻，励磁功率小，而且制动力矩与转动件转速无关，但磁粉会引起零件磨损。它便于自动控制，适用于各种机器的驱动系统。②电磁涡流制动器。励磁线圈通电时形成磁场，制动轴上的电枢旋转切割磁力线而产生涡流，电枢内的涡流与磁场相互作用形成制动力矩。电磁涡流制动器坚固耐用、维修方便、调速范围大；低速时效率低、温升高，必须采取散热措施。这种制动器常用于有垂直载荷的机械。

液压制动器　一种浸于油中的制动器。该制动器电磁铁的电磁线圈通电后，动铁芯（衔铁）的吸力推动推杆驱动活塞运动，通过油道使油增压从而使制动瓦块动作。由于其运动部件浸于油中，润滑条件好，动作平稳，制动力矩和行程可以调节，因而普遍应用于负载惯性较大的机械的制动，并且运行噪声小，机械磨损小，寿命长。

zhineng diannengbiao

智能电能表

(intelligent watt-hour meter)　具有自动计量/测量、数据处理、双向通信和实时数据交互等功能的电能表。智能电能表是智能电网高级量测体系（AMI）的基础元件之一，承担电能数据采集、计量、传输和处理的任务，支持智能电网对用电负荷管理、分布式能源计量、电网运行调度、电力市场交易和电能质量监测等方面的要求。按工作原理分类，智能电能表属于电子式电能表，其结构框图如图所示。



智能电能表结构框图

智能电能表具备综合数据采集能力，包括电压、电流、有无功电量和功率；支持预付费及远程管理；支持远程负荷控制；支持双向通信，为未来家庭自动化网络提供数据网关。

国际上对智能电能表还没有统一的定义和标准，一些国家或组织对智能电能表有不同的描述或期望。

欧洲智能表计联盟（European Smart Metering Alliance，ESMA）对电能表的定义：①支持计量数据自动处理、传输、管理和使用；②支持电能表的自动化管理；③支持电能表之间的双向通信；④支持向智能计量系统内的参与者（包括能源消费者）提供实时的、有价值的能耗信息；⑤支持改善能源利用效率和能源管理系统（发电、输电、配电、用电）的服务。

美国需求响应和高级计量联盟（Demand Response and Advanced Metering Coalition，DRAM）对电能表的定义：①支持计量不同时间段内的能源使用数据，包括每小时的或者权威部门制定的时间段；②允许电力消费者、电力公司和服务机构以各种形式的电价进行电力交易；③提供其他数据和功能以提高电力服务质量及解决服务中的问题。

zhinenghua diya dianqi

智能化低压电器

(intelligent low-voltage apparatus)

利用计算机控制技术、传感器技术及通信技术，实现保护、控制、监测、记录、显示等功能于一体的低压电器。智能化低压电器具有自动检测和识别故障类型及操作命令类型的功能。

组成　智能化低压电器由执行单元和监控单元组成。执行单元为开关电器元件，即低压电器本体；监控单元由输入量模块、中央控制模块、输出模块和通信模块四大模块组成。输入量经过相应的变换器变成与中央控制模块兼容的数字量和模拟量。中央控制模块是以微处理器为核心的最小系统，完成对低压电器运行状态和参数的处理，下达控制命令，进行合、分操作。输出模块接受中央控制模块操作控制信号，传送至低压电器的操动机构，使其按照指定方式操作。智能化低压电器的运行参数可以通过通信模块上传至中央控制计算机，并可接受计算机发送的信息和指令。智能化低压电器原理框图如图1所示。

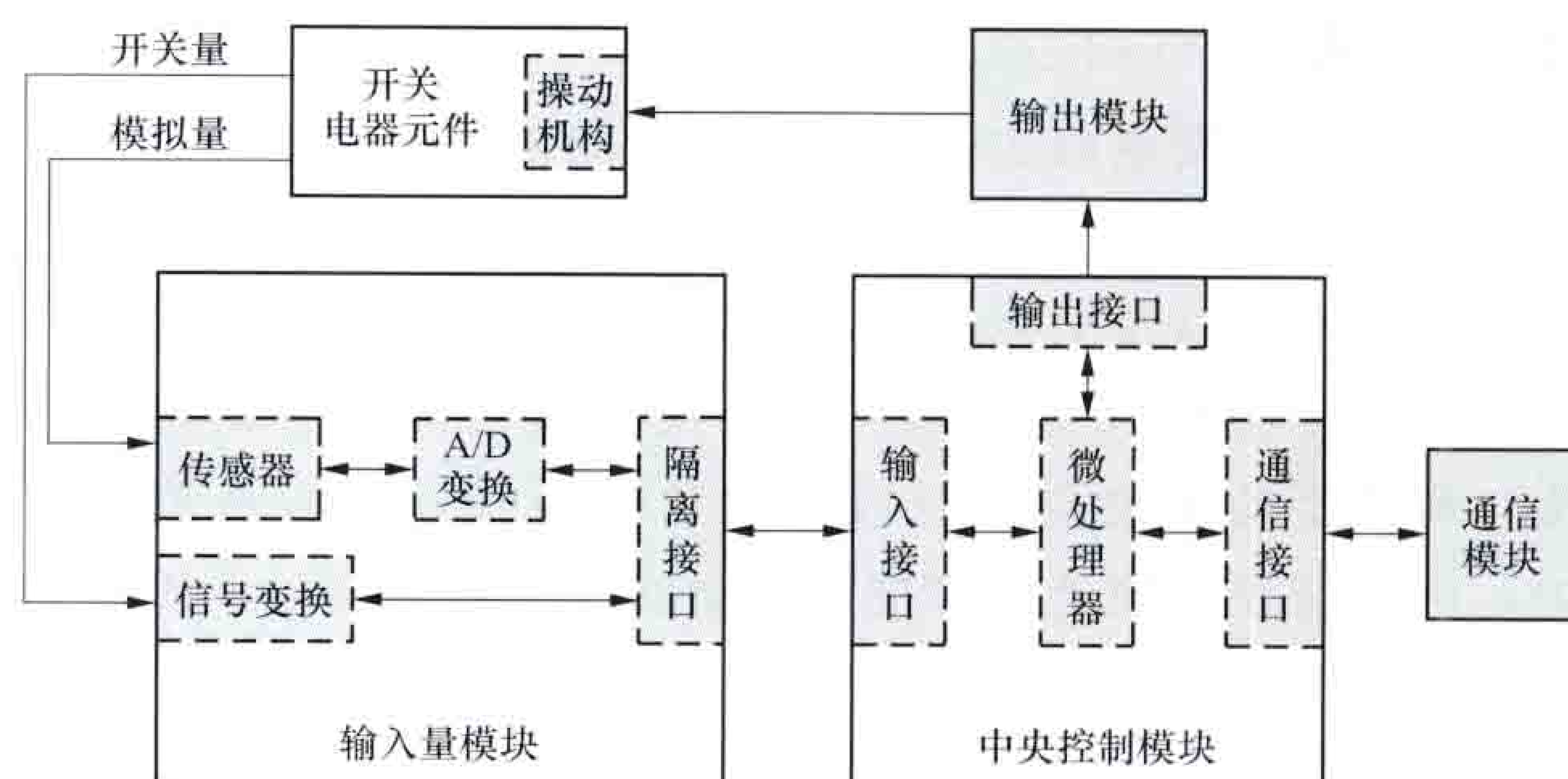


图1　智能化低压电器原理框图

监控单元基本功能：①现场运行参量的监测。测量现场电压、电流、有功和无功功率、功率因数、电源频率、电能及需要监测的其他非电参量，并能实现本地数字化显示或上传至控制中心。②保护。根据现场运行参量的检测结果，判断有无故障及故障类型，在出现故障后完成相应的操作。③故障诊断和运行状态监测。包括对控制单元主要硬件设备的自诊断、被控对象和开关元件自身故障的诊断，监测开关电器的运行状态和参数。④本地/远程调控。现场通过键盘、面板开关，或由通信接口接收控制中心的操作信息，完成智能化低压电器功能投退、保护参数设置以及被控开关电器的

分合操作。⑤通信。采用统一的通信协议或协议转换技术，保证控制中心与远方运行现场间各类信息的自动交换，实现对整个系统中各设备的综合监控和管理。

特点　包括：①现场参量处理数字化。智能化低压电器运行现场的各种被测量全部采用数字化处理，提高了测量和保护精度，减少了产品保护特性的分散性，并通过软件改变处理算法，不需修改硬件结构设计，就可以实现不同的保护功能。②功能多样化。智能化低压电器可以集成用户需要的各种功能，实时显示各种运行参数；可以根据工作现场的具体情况设置保护类型、保护特性和保护阈值；可以对运行状态进行事故分析；按用户要求保存运行的历史数据，编制并打印报表等。③设备网络化。可以把智能化低压电器当作计算机通信网络中的通信节点，采用数字通信技术，组成低压电器智能化通信网络，完成信息的传输，实现网络化管理、设备资源共享。④实现分布式管理与控制。智能化低压电器的智能监控单元能够完成对电器设备本身及其监管对象要求的全部监控和保护，使现场设备具有完善的、独立的处理事故能力和完成不同操作的能力，可以组建完全不同于集中控制或集散控制系统的分布式控制系统。⑤组成全开放式系统。采用计算机通信网络中的分层模型建立起来的低压电器智能化通信网络，可以把不同生产厂商、不同类型但具有相同通信协议的智能电器互联，实现资源共享，达到系统的最优组合。通过网络互联技术，可以把不同地域、不同类型的电器智能化通信网络连接起来。

典型产品　典型智能化低压电器包括智能框架式断路器、智能塑料外壳式断路器、智能剩余电流动作保护器、智能交流接触器和智能化电动机保护器。

（1）智能框架式断路器。其基本功能包括过载长延时、短路短延时、短路瞬时保护，用户根据需要可以对动作值进行现场整定；扩展功能包括电压、电流、频率、功率、功率因数、电能、谐波、电压不平衡测量，相序检测，过电压、欠电压、过频、欠频、相序、逆功率保护，需用值保护，电压不平衡保护，接地漏电保护；附加功能包括故障记录、历史记录、波形记录、触点当量记录、通信区域联锁。（见万能式断路器）

（2）智能塑料外壳式断路器。由于体积受限制，其保护功能较智能框架式断路器少得多，只有过载长延时、短路短延时、短路瞬时、接地故障和中性极等保护。智能塑料外壳式断路器电流测量精度高（误差为1%～3%）、计时准确（容易级联成区域联锁选择性保护）、分断速度快（<30ms）、保护特性多且可调。 （见塑料外壳式断路器）

（3）智能剩余电流动作保护器。将单片机和零序互感器嵌入到塑料外壳式断路器中成为剩余电流保护断路器，见图2，剩余动作电流可调，分脱扣时间可调和只报警不脱扣



图2　智能剩余电流保护断路器

（消防应用）两种，同时具有数码显示和通信联网功能。剩余电流变化量保护技术和自动调节剩余电流动作值的自适应保护技术的应用，消除了漏电保护死区，提高了剩余电流保护的智能化水平，保证了剩余电流保护的可靠性和有效性。（见剩余电流动作保护器）

（4）智能交流接触器。将人工智能等技术引入接触器的控制系统，对接触器的动态吸合过程进行控制，保证大容量交流接触器实现零电压接通、无弧或少弧分断，提高接触器的电寿命和机械寿命。控制电路带延时通断功能并可现场设定，带现场总线接口便于组网。

（5）智能型电动机保护器。采用电子技术和单片机技术实现电动机的过载保护，扩大了过载保护电流整定范围和脱扣级别，降低了过载保护动作时间的分散性，可以替代热过载继电器，提高了电动机过载保护的可靠性。

Zhongguo Enfei Gongcheng Jishu Youxian Gongsi

中国恩菲工程技术有限公司　(China Enfi Engineering Co., Ltd.)　中国恩菲工程技术有限公司简称中国恩菲（英文简称ENFI），前身为中国有色工程设计研究总院。中国有色工程设计研究总院是集技术研发、工程一体化、产业投资为一体的科技型企业，坐落于北京长安街畔。

中国有色工程设计研究总院先后承担过国内外有色金属、建筑、环境工程等20多个行业的3000余项工程总承包、项目管理、工程咨询、工程设计、工程监理、环境评价、设备制造等技术服务；完成国家多项重点工程设计和科研课题，获得国家级、省部级科学技术奖、优秀工程总承包奖、优秀工程设计奖、优秀工程咨询奖等各类奖项近700项，取得了1000多项科研成果、200多项专有专长技术和200多项授权专利。

中国恩菲拥有工程设计综合甲级资质，具有涉外经营权、涉外工程总承包权和外事审批权。在一直保持有色行业领先地位的同时，逐步形成了工程一体化、新能源产业和资源开发业务板块。主营业务包括提供从咨询设计到总承包的工程一体化服务，以多晶硅材料生产为龙头的新材料产业，光伏发电产业，污水处理BOT（建设-运营-移交）项目，垃圾焚烧发电BOT项目以及矿产资源开发投资。

中国恩菲拥有优秀的专业人才队伍，有中国工程院院士1名、全国设计大师3名、有色金属行业设计大师4名、享受政府特殊津贴专家82名、高级工程师（含教授级高级工程师）400余名，超过1/3的员工具有研究生学历。

Zhongguo nongcun dianqihua

中国农村电气化　(rural electrification in China)
中国农村用电普及率及用电水平的综合反映。由政府主导，电网企业组织，以县级或乡村行政区域为单元实施，当其用电水平等指标达到规定的水平，便被确定为农村电气化县或电气化乡、电气化村。图1所示为完成农网改造后的重庆林湾村。

1923年，中国江苏省戚墅堰的震华发电厂通过6kV电力线路，为附近农村的农田排灌和碾米加工供电，中国的农业生产开始用电。此后在大城市郊区和南方沿海地区的农村，有少量生活照明用电，但发展缓慢。1949年中国农村年用电量仅2000万kW·h。1949年以后，中国农村电气化的发展

可分为三个阶段：



图 1　农网改造后的重庆林湾村（周南岭　摄）

（1）起步阶段。20 世纪 50 年代是中国农村用电的起步阶段，主要是结合水利建设兴建小型水电站，或是大城市 6～10kV 配电网向农村延伸发展农村用电。

（2）快速发展阶段。1961 年中国政府在水利电力部设置农村电气化司，管理农村电气化发展建设工作，农村电气化建设纳入国家计划，进入快速发展时期。1960～1980 年，35、110kV 高压配电网向农村延伸，与中、小型电厂共同向农村供电，农村电源及用电水平提高较快。

（3）建设农村电气化县和规范化发展阶段。1983 年，国家颁布的初级农村电气化县标准的主要指标有：①全县 90%以上的农户用上电；②全县平均每人年用电量 200kW・h，每年人均生活用电量 30kW・h。这个标准主要适用于以小水电供电为主的地区，中国政府批准在小水电发达地区试点建设 100 个初级农村电气化县的计划。1989 年浙江省桐乡县建成了国家电网供电区的第一个电气化县。1990 年以后中国农村电气化建设走上规范化、标准化发展道路。1991 年国家颁布的农村电气化县标准的主要指标有：①全县 100%的乡村通电，95%的农户用上电；②全县人口年平均用电量 300kW・h 以上，农业人口年平均用电量 160kW・h 以上，农业人口年平均生活用电量 50kW・h 以上；③农村电源和电网结构合理，供电质量合格率 90%以上，农村生活用电保证率 90%以上。这个标准主要适用于以大电网供电为主的地区。这两个标准在一段时期同时使用，用于指导不同地区农村电力发展。

1994 年中国政府提出到 20 世纪末建设 1000 个电气化县（国家电网供电区 400 个电气化县，小水电供电区 600 个初级电气化县）的计划。1998 年国家实行“改革农电管理体制、改造农村电网、实现城乡用电同网同价”工作。到 1999 年，全国建成初级农村电气化县 427 个，农村电气化县 500 个，共建成电气化县 927 个，约占全国总县数的 37.62%。

1998 年，大规模农网改造工程正式启动，至 2004 年共历时 6 年的两期农网建设和改造工程完成，工程惠及 1.5 亿户农民，解决了农民基本生产生活用电问题，见图 2。2003 年开始实施县城电网改造，2007 年工程竣工。2004 年，国家针对农村电网改造面偏低、供电能力不足等问题，启动了农网完善工程。2006 年开展“户户通电”工程。2007 年中央一号文件提出继续推进农村电网改造和建设，落实城乡同网同价政策，加快户户通电工程建设。

2010 年，全面启动实施了新一轮农村电网改造升级工程。通过实施农网改造和新农村电气化工程，有力助推了“家电下乡”和发展设施农业等政策落实，电气化村每百户居民拥有的电视机、电冰箱、洗衣机、电风扇、空调、电炊具比工程实施前分别增长 18.9%、32.4%、28.3%、19.4%、64.5%、42.2%。电气化建设使广大农民享受到了充足、可靠、优质、方便的供电服务。到 2010 年，累计建成新农村电气化县 407 个、电气化乡镇 4991 个、电气化村 90 053 个。2011 年 12 月，随着青海玛多县通电，中国结束无电县历史（无电县的含义是：①全县发电装机容量小于 1000kW 或变电站主变压器容量小于 1000kV・A；②全县年人均用电量小于 10kW・h）。

农村小水电是农村，特别是偏远山区的重要民生设施和民生工程。水能资源是清洁可再生能源，中国农村水能资源丰富，20 世纪 80 年代初，中共中央国务院决定在农村水能资源丰富的地区，以小水电为主推进中国特色农村电气化。“十一五”期间，中国建成 432 个水电农村电气化县，累计解决 90 万无电人口用电问题。至 2010 年，全国建成 653 个农村水电初级电气化县和 409 个水电农村电气化县。2011 年，中国全面启动了“十二五”水电新农村电气化县建设工作，规划 5 年内建成 300 个水电新农村电气化县，基本解决规划区内的无电人口用电问题。



图 2　农网改造施工现场（谢家弟　摄）

Zhongguo nongcun yongdian guanli

中国农村用电管理　（management at rural electricity consumption in China）　对农村电力的消费进行有目的的组织、规范、协调、服务等活动。农村用电管理的目的：①更好地进行农电营销活动；②按规定规范管理农村电价电费，使农村电价趋于合理；③落实各项安全措施，保证用户的生命、财产安全；④指导和帮助用户合理使用电能，降低电能损耗，提高电能利用率，减少用户电费支出；⑤普及有关供用电的法律知识，实施用电监督，维护正常的供用电秩序。

由于中国农村电力建设和发展的特殊性，农村用电管理有其鲜明的时代特征，大致分为三个阶段。第一阶段从 20 世纪 50 年代末到 70 年代末，这一时期中国对农村用电基本实行“自建、自管、自用”的原则。农村用电管理以产权分界点为界，国家统一定价，电费由人民公社或生产大队统一缴纳，农村用电管理的重点是计划用电、安全用电、节约用电。第二阶段是从 80 年代初到 1998 年中，这一时期农村实行经济体制改革，原有的农村低压电力资产变为农民群众集体所有，在乡镇成立电管站，负责低压电力资产的管理、维

护和用电收费。这一时期政府部门的工作重点是指导乡镇电管站对农村用电的管理，培训和提高乡镇电管站人员的技术、业务水平，加强农村用电安全宣传，规范农村电价，保持电价的相对稳定。第三阶段是1998年末国家开始实施农电“两改一同价”，即改造农村电网、改革农电管理体制、实现城乡同网同价。至2007年，绝大部分县供电企业基本实现了政企分开，完成农村用电管理体制改革工作，原乡镇电管站改为农村供电所，其人、财、物纳入县供电企业统一管理，成为县供电企业的派出机构。

农村用电管理主要包括农电营销管理、农村用电安全管理以及农村节约用电管理。

农电营销管理　按照国家政策法规，规范电力企业与用户之间的电力经营与消费的活动。到2002年，农电营销管理基本实现：①电量公开、电价公开、电费公开；②销售到户、抄表到户、收费到户、服务到户；③统一电价、统一发票、统一抄表、统一核算、统一考核。进入“十一五”以后，随着农村电力管理体制的完善和配用电技术水平的不断提高，农电营销管理的手段和服务功能逐步向自动化、信息化和互动化方向发展。

农村用电安全管理　对农村用电过程中的电气设备与电工作业行为和环境条件进行监督检查，以保障生命、财产安全和预防事故停电为目的的活动。农村用电安全管理日常工作的内容主要包括：①进行用电安全的宣传教育，普及用电安全知识，了解紧急救护法的基本要求，懂得常用电气设备的使用方法。②进行电工作业人员上岗前的技术培训、考核和日常的监督管理工作（见用户电工管理）。③进行规章制度执行情况的检查，主要检查国家与行业主管部门颁发的有关供用电安全的技术标准、法规和规章的执行情况。④进行常规的用电检查工作（见用电安全检查），如供电设施施工中间检查、受电装置竣工接电前的检查、定期检查、季节性检查和特殊情况下的检查等。⑤做好安全技术与组织措施的落实，如提高三级剩余电流动作保护器的安装和投运率，其中第三级剩余电流动作保护装置产权属用户。⑥其他用电安全工作的指导与帮助，如用户电气事故的应急处置（见用户电气事故管理），用户设备的修试检查（见用户电气试验）。

农村节约用电管理　对农村电力的合理使用与节约进行有目标的控制活动。目的是在满足农村电力用户相同需要条件下，通过采取技术上可行、经济上合理及对环境保护无妨碍的各种措施，合理使用电能和改进电能应用技术，降低消耗，减少浪费。

主要方法：①改造农网，改善网络结构，实行无功补偿，缩小供电半径，一般要求10kV的供电半径不大于15km，380V的供电半径不大于0.5km。②针对农村用电负荷季节性变化大，电力设备空载、轻载时间较长的特点，适时进行设备的投切和调整，提高设备的负载率。主要措施是采取具有两种不同额定容量的调容配电变压器（简称调容变，包括无载调容和有载调容两种类型）或两台不同容量的配电变压器（又称子母变压器），根据负荷变动情况适时进行投切。③更新改造高耗、低效的电力设备，如采用S11型及以上节能型变压器或非晶合金变压器取代S7型和S9型配电变压器等。④推广应用节约用电技术和装置，如电动机、交流电焊机加装节电装置，应用红外线、电热膜加热技术，风机、水泵流量采用交流变频调速控制装置，推广节能灯具等。⑤加强农村节电的日常管理工作，完善低压配电网线损管理和考核，增强对计量表计的管理，堵塞漏洞和浪费，做好用电调查，制定和落实避峰填谷等节电措施，组织用户开展节能技术交流，帮助用户搞好内部节能管理。

Zhongtie Dianqihua Kance Sheji Yanjiuyuan Youxian Gongsi

中铁电气化勘测设计研究院有限公司　(China Railway Electrification Survey Design & Research Institute Co. Ltd., EDI)　电气化勘测设计研究院（简称电化院）创建于1955年10月，2007年10月30日正式改制为中铁电气化勘测设计研究院有限公司，隶属中国中铁电气化局集团有限公司。

电化院伴随着中国铁路事业的发展不断成长壮大，逐步发展成为集勘察、设计、研究、咨询、监理为一体的设计研究院，具有年设计干线铁路3000km、城市轨道交通400km和监理2000km的设计监理能力。

50多年来，电化院连续创造了中国电气化铁路史上的7个第一：第一条干线电气化铁路——宝成线；第一条一次建成电气化的新建铁路——阳安线；第一条双线电气化铁路——石太线；第一条采用AT供电方式及微机远程控制的电气化铁路——京秦线；第一条开行重载单元列车的电气化铁路——大秦线；第一条时速达200km的电气化铁路——广深线和第一条干线高速电气化铁路——京沪线。



中铁电气化勘测设计研究院有限公司标志

20世纪90年代初，电化院开拓地铁设计新领域，跨入了城市轨道交通供电设计行业，创造了城市轨道交通的六个第一：第一条供电设备实现国产化的高架城市轨道交通——上海明珠线工程；第一条采用刚性悬挂接触网系统的地铁——广州地铁2号线；第一条时速达120km/h的快速地铁——广州地铁3号线；第一条首次采用直线电动机及1500V第三轨技术的线路——广州地铁4号线；第一条独轨——重庆轻轨；第一条城郊快速线——天津轻轨。“九五”期间，电化院凭借自己的技术实力和服务理念，成功进入香港铁路和地铁市场项目——香港西部铁路和将军澳地铁以及伊朗德黑兰—梅沙电气化铁路。1984年至今，电化院在承担的干线铁路项目和城市轨道交通设计项目中，先后有33项获优秀设计奖，14项获优质工程奖，10项获科技进步奖，3项获鲁班奖和詹天佑奖。其中省部级奖49项，国家级21项。

电化院持有中国住房和城乡建设部颁发的铁道行业甲（Ⅱ）级、铁道行业（电气化）专业甲级、市政行业（轨道交通工程）专业甲级、工程造价咨询甲级、工程监理甲级资质证书和国家发展和改革委员会颁发的铁路、城市快速轨道交通、水文地质、工程测量、岩土工程、建筑、生态建设和环境工程咨询甲级资质证书，以及天津市建委颁发的建筑行

业（建筑工程）乙级、工程勘察（岩土工程、工程测量）乙级和天津市气象局颁发的防雷工程专业设计丙级资质证书等。

2007年12月，电化院被天津市科学技术委员会认定为高新技术企业。2008年3月，在北京由CECA国家信息化测评中心主办召开的2007年度“中国企业信息化500强”暨中国企业领袖信息化高峰论坛大会上，电化院荣膺2007年度“中国企业信息化500强”，并获得2007年度“中国企业信息化500强”最佳信息化战略奖和“中国企业信息化500强”最佳协同设计应用奖。

zhongxingdian jiedi dianzuqi

中性点接地电阻器 （neutral grounding resistor）

一种以电阻为主要元件、接在配电系统中性点的接地装置。配电系统中性点经电阻器接地能降低弧光接地过电压的危险性，实现有选择性的接地保护，同时这种接地方式的接地电流比直接接地方式小，对邻近通信线路的干扰也较弱。

中性点接地电阻器的材质可分为金属和非金属两种，由于中性点接地电阻器不仅限制单相接地电流，还要确保故障线路的继电保护有足够的灵敏度和选择性，所以必须满足：①有足够的热容量。短路电流通过电阻时所产生的温升，不致使电阻元件有严重变形、表面氧化现象。②电阻材料的温度系数要小。短路时的温升不会使阻值急剧上升，引起短路电流下降，影响继电保护的可靠动作。

中性点接地电阻器的电阻可分为高电阻、中电阻和低电阻3种形式，其阻值与单相接地故障电流的范围见表。

中性点接地电阻器阻值与单相接地故障电流的范围

电阻形式	高电阻	中电阻	低电阻
电阻阻值（Ω）	数百～数千	10～100	＜10
单相接地故障电流（A）	＜10	30～300	600～1000

zhongya peidianwang zhongxingdian jiedi fangshi

中压配电网中性点接地方式 （neutral point treatment of medium-voltage distribution networks）

中压配电网的中性点与参考地之间的电气连接方式，又称中压配电网中性点运行方式。中压配电网中性点常用接地方式主要有中性点直接接地、中性点经小电阻接地、中性点经消弧线圈（消弧电抗器）接地、中性点不接地四种。中性点直接接地和中性点经小电阻接地也称为中性点有效接地或大电流接地，中性点经消弧线圈（消弧电抗器）接地和中性点不接地也称为中性点非有效接地或小电流接地。

中性点直接接地　中性点直接与大地连接。这种系统中性点的电位固定为地电位，当某一相由于对地绝缘损坏造成接地时，便造成单相短路。由于中性点的电位被固定为零，因而相对地的绝缘水平取决于相电压，这就大大降低了电网的造价。电压等级愈高，其经济效益愈显著，这就是中性点直接接地系统的优点。但当系统发生单相短路时，短路电流很大，危害严重，故障线路不能继续运行。实际上配电网的绝大部分故障是单相接地故障，其中瞬时性故障又占很大比例，这些故障都会引起供电中断，大大影响供电可靠性。

中性点经小电阻接地　中性点与大地之间连接一个阻值较小的电阻，电阻的大小应使流经变压器绕组的故障电流不超过每个绕组的额定值。经小电阻接地的配电网发生接地故障时，非故障相电压可能达到正常值的$\sqrt{3}$倍。

中性点经小电阻接地的配电网中，接地电阻的选取一般参照考虑下列情况：①以电缆为主的配电网，单相接地时允许阻性接地电流较大，如1000～2000A；②以架空线路为主的配电网，允许阻性接地电流较小，如300A；③考虑配电网远景规划中可能达到的对地电容电流；④考虑对电信设备的干扰和影响以及继电保护、人身安全等因素。

相对于中性点直接接地配电网，小电阻接地配电网单相接地故障电流较小，所引起的过电流危害相对较小。但由于同样必须立即切断故障线路，会造成供电中断，供电可靠性较差。

中性点经消弧线圈接地　中性点与大地之间连接一个具有铁芯的可调电感线圈，即消弧线圈。当发生单相接地故障时，电感线圈的电感值被调整到使单相接地故障时流过它的工频电感电流基本抵消了接地故障电流的工频电容电流分量，因此可消除接地处的电弧。另外，当接地电流过零值而电弧熄灭之后，消弧线圈的存在可以显著减小故障电压的恢复速度，从而减小电弧重燃的可能性，使单相接地故障容易自动消除。配电网故障中绝大部分是单相接地故障，采用中性点经消弧线圈接地方式，在系统发生单相接地时，流过接地点的电流较小，其特点是线路发生单相接地时，可不立即跳闸。中国相关运行规程规定，电网可带单相接地故障运行2h。因此，中性点经消弧线圈接地方式大大提高了供电可靠性。

早期消弧线圈采用人工调整方式，操作起来比较麻烦，并且难以及时、准确地跟踪电容电流的变化，自动跟踪补偿装置的采用，克服了上述缺点。

中性点不接地　中性点与大地之间不连接。这种系统中发生单相接地故障时，不构成短路回路，接地相电流不大，不必马上切除接地相。这时由于线电压保持不变，三相系统的平衡没有破坏，三相电力用户可以继续运行，因而供电可靠性高，这是中性点不接地系统的主要优点。但是配电线路和电气设备的对地绝缘水平必须按线电压设计，因非故障相对地电压升高到正常值的$\sqrt{3}$倍，若长期带接地故障运行，可能会引起非故障相绝缘薄弱处的损坏，继而发展成为两相短路。中国相关运行规程规定，单相接地故障时持续运行的时间不得超过2h。

中性点不接地系统一般适用于配电系统接地电容电流$I_C \leqslant 10$A的配电网。当接地电流较大（大于30A）时，将产生稳定的电弧，形成持续性的电弧接地，电弧的大小与接地电流成正比，强烈的电弧将会损坏设备，甚至导致相间短路；而当接地电流小于30A而大于5A时，有可能产生间歇性电弧，出现间歇性过电压，其幅值可达2.5～3倍相电压，足以危及整个配电网的绝缘。

接地方式综合比较　不同的接地方式，对人身和设备的安全、系统过电压、继电保护、供电可靠性等方面有不同的影响。

从人身和设备的安全来看，在中性点不接地方式中，由于单相接地电流产生的电弧比较大，而且难以自熄，常常使电缆等设备的相间绝缘烧坏，造成短路。从保护接地的作用

来看，除了采用消弧线圈的接地方式外，当单相接地时，电流都比较大，都可能使接触电压超过规定值，因而造成人身触电的危险。

从抑制各种过电压来看，中性点直接接地方式、中性点经小电阻接地方式为最好；而从供电可靠性来看，中性点不接地方式和中性点经消弧线圈接地方式为最好。

从实现单相接地保护的难易程度来看，中性点不接地方式、中性点经消弧线圈接地方式比较难。随着微机继电保护技术的发展，利用故障产生的暂态零序电流与电压，能够可靠地选出故障线路，使小电流接地故障选线的灵敏度及可靠性有了很大提高，为推广中性点经消弧线圈接地方式创造了条件。

从供电可靠性来看，采用中性点不接地或中性点经消弧线圈接地方式的系统，发生单相接地故障时，可以继续运行的一段时间，供查找甚至处理故障点，供电可靠性较高；而中性点经小电阻接地系统或直接接地的系统，一旦发生单相接地故障，立即跳开线路开关，供电可靠性较低。各种中性点接地方式的综合比较见表。

各种中性点接地方式的综合比较表

中性点接地方式	不接地	经小电阻接地	经消弧线圈接地	直接接地
单相接地电流	较小	大	小，与脱谐度有关	最大
人身触电的危险性	大	大	减小	最危险
单相电弧接地过电压	最高	低	较高	最小
单相接地保护的实现	较难	易	难	很容易
铁磁谐振过电压	高	低	高	低
操作过电压	最高	最低	较高	低
供电可靠性	高	低	最高	低

配电网中性点接地方式的选择确定是一个系统工程，对不同地区、不同配电网、不同发展阶段和不同的受电对象，应对各种接地方式进行技术经济分析、权衡利弊，因地制宜地选择最佳的接地方式。从提高供电可靠性的角度，中性点经消弧线圈的接地方式是最佳的选择，这也是中压配电网中性点接地方式发展的潮流。

发展与展望　第一次世界大战期间（1914～1918年），德国工程师首先研制成消弧线圈，其后在各种电压等级的电力网中大量发展中性点经消弧线圈接地方式，在30～220kV的系统中都采用了这种接地方式，甚至在德国柏林市的30kV、1400km电缆配电网中，电容电流高达4000A，还是采用了经消弧线圈接地方式。英国33kV及以下的架空配电网逐步由直接接地或经小电阻接地改为经消弧线圈接地，电缆配电网仍为经小电阻接地。法国中压配电网的标准电压等级是20kV，它的城网大部分采用经小电阻接地的方式，但是随着用户对供电可靠性提出更高要求，法国电力公司在城郊将架空线路或架空电缆混合的中压配电网的中性点逐步改造成为中性点经消弧线圈接地。美国22～70kV中压配电网主要采用中性点直接接地或经小电阻接地方式，美国电网的系统备用容量大，网架结构坚强，自动化水平高，因此它的供电可靠性维持在较高水平。日本在第二次世界大战后受美国的影响，它的中压配电网中性点接地方式由以前的经消弧线圈接地为主改造成以直接接地方式为主。

中国在20世纪80年代以前，基本沿用苏联的规定，中压配电网多采用中性点不接地或经消弧线圈接地方式。改革开放后，中国沿海一些大城市经济快速发展，电网的容量和规模急剧扩大，配电线路逐步实现电缆化，系统电容电流急速增长。在这种情况下，为了解决弧光接地过电压、断线谐振过电压等导致中压配电网设备故障频繁，以及中性点经消弧线圈接地系统也因为本身调谐以及保护选择性差等问题，部分城市（如广州、厦门岛内等）的电力部门选择了经小电阻接地的中压配电网中性点接地方式。

随着社会对供电可靠性、电能质量、人身安全等问题的更加关注，以及传统消弧线圈接地系统两大难题的解决——消弧线圈自动补偿自动调谐装置的良好应用和新原理的继电保护装置选线准确率的大大提高，使得消弧线圈接地系统的技术指标得到了优化，消弧线圈接地方式成为中压配电网比较理想的中性点接地方式。

zhongzhi gongdian

中止供电　（temporary suspension of power supply）

供电企业暂时停止对用户供电的行为。根据中国电力法律法规和规章，供电企业可以行使中止供电权利的法定情形，包括用电人确有危害供用电安全行为、窃电行为和逾期经催缴仍不缴付电费行为等。实施中止供电时，一般须经批准并事先通知用户或进行公告。但遇到不可抗力、紧急避险或者确有窃电行为的，允许供电企业不经批准即可中止供电，当引起中止供电的原因消除后，供电企业应在规定的时限内恢复供电。

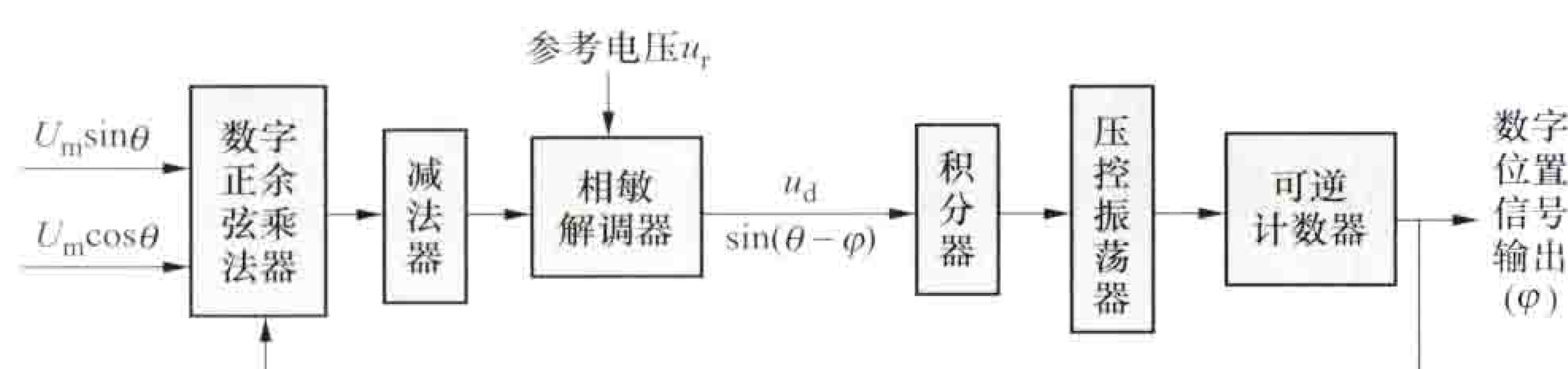
zhoujiao bianmaqi

轴角编码器　（shaft encoder）　将角位移、角速度转换成数码或电脉冲信号的检测元件，是一种控制电机。轴角编码器是基于电磁感应原理工作的元件，包括感应同步器轴角编码器和自整角机/旋转变压器轴角编码器两种。

感应同步器轴角编码器　将感应同步器输出的信号用电子线路进行数字编码，产生代表轴角位置的脉冲信号，配以计数和显示单元可构成数显表。感应同步器有鉴相型和鉴幅型两种。用鉴相型感应同步器测量轴角位置时，将它输出的正弦信号与同频率的正弦基准信号的相位进行比较，并将两者的相位差转换成一定频率的脉冲个数，再通过计数器算出轴角位置。实际应用中，为了提高测量精度和方便显示，需采用粗、精通道组合及分频等手段。鉴幅型感应同步器在转子轴角位置变化时，如果相应地改变其正、余弦绕组的励磁电压，便可使输出电压信号为零。根据这种关系，用编码电路把励磁电压的变化转换成数字信号，便可实现轴角位置的测量。

自整角机/旋转变压器轴角编码器　旋转变压器轴角编码器和自整角机轴角编码器的轴角-数字编码原理和线路基本相同，只是自整角机需用一个变换器将它输出的三相电压

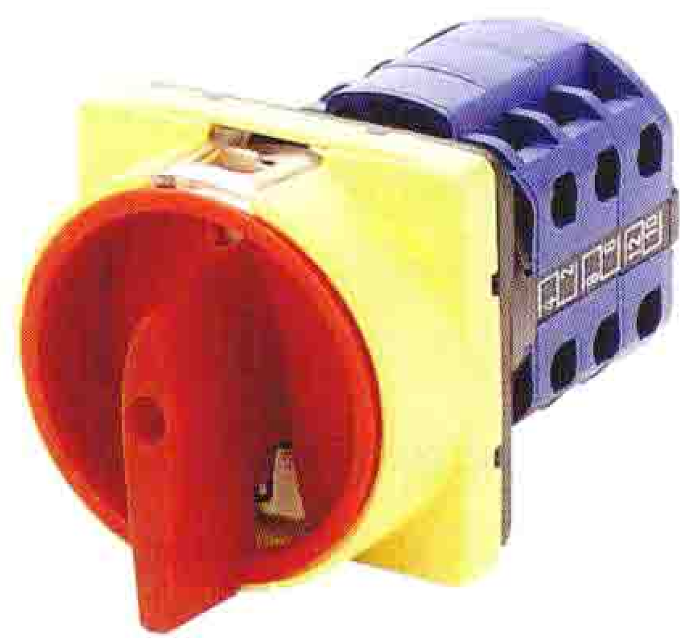
信号转换为类似旋转变压器输出的与轴角位置分别成正、余弦关系的两个电压信号，因此把两者统称为自整角机/旋转变压器轴角编码器。将正、余弦电压变为数字角度量的转换器通常采用实时跟踪反馈式原理。基于这种原理的编码器常以符号 S/R-D 表示，其结构框图如图所示，它的反馈环路实际上是一个数字随动系统。可逆计数器的任一个输出都代表一个角度 φ，正余弦乘法器输出的模拟电压在减法器中相减后，得出的误差信号输入相敏解调器后，产生一个与 $\sin(\theta-\varphi)$成正比的误差信号 u_d，再经积分器和压控振荡器，得到频率正比于 u_d 幅值的脉冲。可逆计数器对该脉冲进行加或减计数，使输出的 φ 值不断趋近 θ。当可逆计数器中的数字角度 φ 等于模拟输入角度 θ 时，该系统平衡。跟踪式 S/R-D 转换器能实时、连续地测量角度而没有静态误差，工作频带较宽，抑制噪声和谐波能力强。这种跟踪式变换器已有高集成度的模块化产品。除了数字角度信号外，它还能输出模拟转速信号和转向信号，该转速信号可以代替控制系统中的测速发电机。



跟踪式 S/R-D 转换器的结构框图

zhuling dianqi

主令电器 (master switch) 用来接通、分断、转换控制电路或对生产过程实行程序控制，并发布控制命令的低压电器，又称主令开关。主令电器主要由触头系统、操动机构和定位机构组成。由于它所转换的电路为控制电路，触头的工作电流不大，因此结构尺寸及操作力都不太大。常用的主令电器有按钮、万能转换开关（见图）、限位开关（行程开关、微动开关、接近开关）、主令控制器、脚踏开关、倒顺开关、紧急开关、钮子开关等。其中微动开关、行程开关和限位开关在结构上很相似，主令控制器的结构则与转换开关相似。主令电器常用来控制电力拖动系统中电动机的起动、停车、调速及制动等。


万能转换开关

zhubei dianchi

贮备电池 (reserve battery) 使用时需通过注入电解液、加热或充氨等手段激活才能放电的一次性使用的化学电源。贮备电池的最大特点是装配好的电池中不装电解液或电解质是干燥的，因此，没有离子导电通道，使用时，必须进行激活才能发生化学能转变为电能的反应。借助动力源（高压气体或热能）注入电解质溶液或注入溶剂使固态电解质溶解，或加热使固态电解质熔融，建立起离子导电通道的过程称为激活，又称活化。

贮备电池的负极活性物质为镁、锌、钙等金属，正极活性物质为氯化银、氧化铜、氧化银、铬酸钙、氧化钒等，电解质为氯化钠、氢氧化钾、氯化锂和氯化钾的混合物等。激活方式有自动激活和人工激活两种。贮备电池有水（海水）激活电池、电解质激活电池、加热激活电池、气体激活电池等类型，适用于不同的使用场合。

贮备电池的工作电压为 1.4～130V，比能量为 50～600W·h/kg，激活时间为 0.2～2s，激活前贮存期为 10～25 年。

贮备电池最突出的优点是非激活状态下的贮存寿命长并且不需要维护，激活速度快，随时可以使用，输出功率大。缺点是不能像蓄电池那样可预先检验其性能，有失误的危险；结构质量所占的比重较大，使电池组输出的比能量与同一体系的其他电池相比要低。贮备电池适于作火箭、导弹、鱼雷、炮弹、炸弹、核武器等的电源，也可用作应急电源。

zhushang duanluqi

柱上断路器 (pole-mounted circuit breaker) 安装在配电线路杆上能够开断短路电流的开关。主要用于架空配电线路分段区间投切、控制和保护，也可作为市郊或农村变电站进出架空线路的投切控制和保护，同时能监测负荷电流和零序电流。

柱上断路器主要由本体、操动机构和附件三部分组成，操动机构一般为手动或电动弹簧机构。按整体结构区分可分为箱式结构和柱式结构两类；按照绝缘介质的不同，柱上断路器主要有真空断路器和 SF_6 断路器。柱上断路器多采用全封闭结构，密封性能好，提高了防潮、防凝露性能；具有开断性能稳定可靠、无燃烧和爆炸危险、免维护和使用寿命长等特点。

真空断路器　利用高真空作为内绝缘和灭弧介质。柱上真空断路器额定电流常为 400、630A，额定短路开断电流为 12.5、16、20kA，额定电流开断次数达 10 000 次以上，额定短路开断电流开断次数为 30～50 次，能频繁操作。

SF_6 断路器　利用 SF_6 气体作为绝缘和灭弧介质。SF_6 断路器额定电流为 400、630A，额定短路开断电流为 12.5、16kA，额定电流开断次数达 10 000 次以上，额定短路开断电流开断次数为 30～50 次，适合频繁操作。

zhushang fuhe kaiguan

柱上负荷开关 (pole-mounted load switch) 安装在配电线路杆上，具有关合和开断正常负荷电流能力的开关。主要用于架空配电线路的分段和故障隔离。相对于断路器，负荷开关对灭弧装置的动热稳定要求较低，结构较为简单。其操动机构也比断路器的简单，一般为手动或电动弹簧机构。经常处于分闸状态的柱上负荷开关，要求断口具有隔离开关的断口耐压水平。柱上负荷开关多采用密封、全绝缘结构，具有防水、耐腐蚀、抗污染等特点，满足户外使用条件，适应城市环网型电路分断、联络开关使用。

SF_6 真空负荷开关与 SF_6 真空断路器外形、参数相似，区别在于负荷开关不配保护电流互感器，不能开断短路电流，但可以承受短路电流、关合短路电流，具有寿命长、免维护特点，额定电流开断次数达 10 000 次以上，适合于频繁操作。

按灭弧介质不同，可分为油浸式、产气式柱上负荷开关，带有 SF_6 灭弧室或真空灭弧室的柱上负荷开关等。按总

体结构区分可分为箱式结构和敞开式结构两类。

(1) 油浸式柱上负荷开关。因油易燃、操作时易发生爆炸和二次灾害趋于淘汰。

(2) 产气式柱上负荷开关。利用固体产气材料组成的狭缝，在电弧作用下产生大量气体形成气吹灭弧。其结构简单，其主要性能参数，如关合电流、电寿命等偏低，多用于参数要求不高、操作不频繁的场合。

(3) 带有 SF_6 灭弧室的柱上负荷开关。多采用旋弧或压气方式灭弧，断口绝缘为 SF_6 气体间隙，插入式触头接触方式等，其动热稳定、关合、开断性能及绝缘水平均可达到较高的参数，机械寿命、电寿命长，是柱上负荷开关较理想的结构形式。

(4) 带有真空灭弧室的柱上负荷开关。具有优越的灭弧性能，操作功率小，机械寿命、电寿命长。如要求较高的关合电流和动热稳定电流，其触头压力增加较多，导致操作功率较大。作隔离负荷开关时，要防止触头间隙（在高频率下）高压耦合，应考虑加装串联隔离断口。

(5) 箱式结构柱上负荷开关。总体布置与柱上断路器相同，仅在灭弧结构和操动机构方面有所差别。

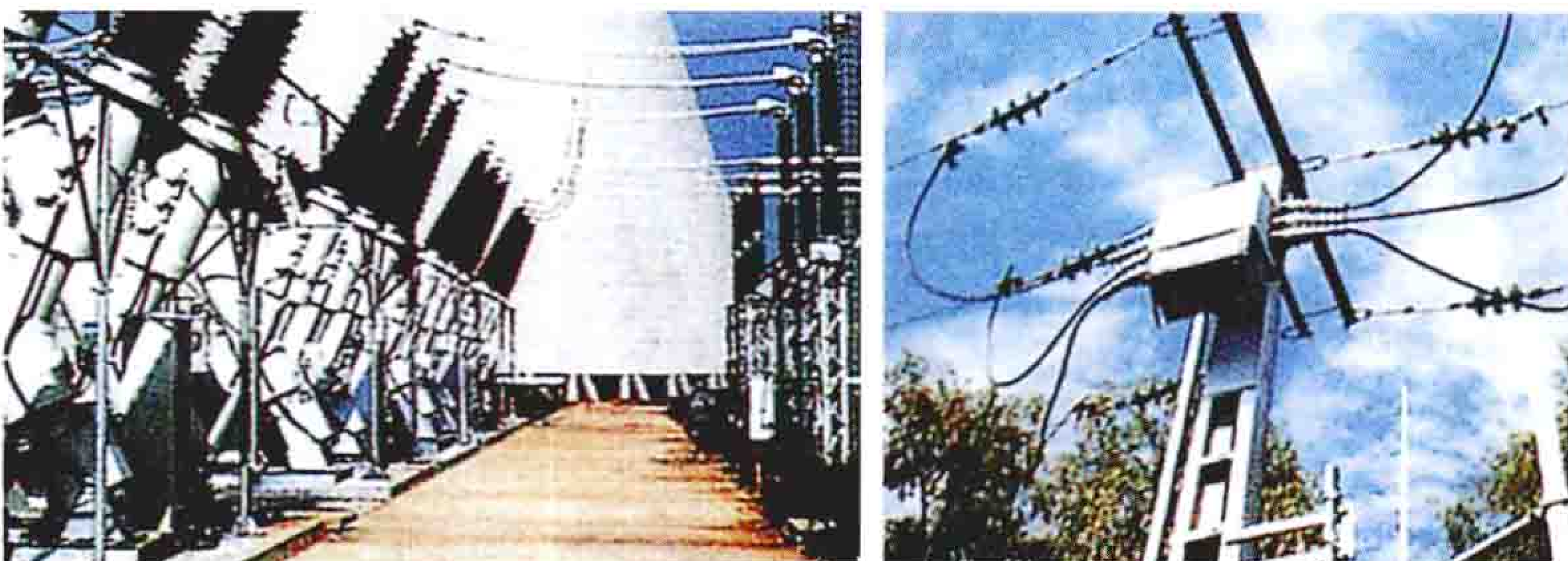
(6) 敞开式结构柱上负荷开关。总体布置与户外隔离开关相似，只是在分闸或分、合闸过程中串入产气、SF_6 或真空灭弧装置。若灭弧装置仅在分闸时串入，则负荷开关的关合过程由隔离闸刀完成，通常闸刀的关合能力因受机械应力等因素限制，一般不超过 31.5～40kA。分、合闸过程均串联灭弧装置的负荷开关，其关合能力一般取决于灭弧装置，可以达到较高的水平（如 50kA）。敞开式结构的优点是有可见的外断口，但外露部分较多，应注重做好防锈蚀措施和绝缘遮蔽措施。

zhushang geli kaiguan

柱上隔离开关 (pole-mounted isolating switch)

安装在配电线路杆上用于在无负载的情况下隔离电路的户外配电开关。柱上隔离开关无灭弧装置，一般不能也不容许切断负荷电流和短路电流，它用来为线路设置一个可以开、闭的明显断口，以满足线路检修、抢修（缩小停电范围）或调整线路运行方式的需要。

柱上隔离开关（见图）按总体结构可分为三相联动式和单相式两种。三相联动式柱上隔离开关通过拉杆连接至安装在电杆离地面适当高度的操动机构上，由人力或电动机构进行三相同步分、合操作，在操动机构上有分、合闸位置的锁定装置，并备有可挂锁的锁孔。单相式柱上隔离开关使用绝缘操作棒逐相操作，通常开关底座在上方，绝缘子倒挂，闸刀向下开启（利用刀片自重形成一个不会“自合”的明显端口），闸刀上有便于操作的钩环，在合闸位置时有防止因自重等因素作用而打开的锁定结构。当单相式柱上隔离开关配用负荷开断器时，则可开断正常的负荷电流，扩大使用范围，经济实用。



隔离开关、PM6 型遥控式柱上隔离开关

柱上隔离开关虽不容许切断负荷电流和短路电流，但因其有一定自然断弧能力，故可开断一定数值的电流。隔离开关可开、合励磁电流不超过 2A 的空载变压器和电容电流不超过 5A 的无负荷线路，开、合电压为 10kV 以下且电流在 15A 以下的负荷，开、合电压为 10kV 及以下且电流在 70A 以下环路电流。在进行这些操作前，要对实际开、合的电流进行核算，操作时必须遵守倒闸操作规定，要注意当时的风向和风速、相间距离和隔离开关与周围带电体或接地体的距离，以防发生事故。采取简单的灭弧措施，如带加速弹簧的弧角，可将 10kV 及以下开、合电容电流的能力提高到8～10A。

柱上隔离开关的绝缘瓷柱大多采用瓷绝缘子（见配电线路绝缘子），也有采用有机绝缘子的，后者更能够长期耐受户外污秽环境。自力型触头（直接利用触头上导电结构材料的弹性，不用弹簧）的接触效果更佳。

zhushang kaiguan zhongduan

柱上开关终端 (pole-top switch terminal unit, PSTU)

对中压配电网架空线路中的分段开关、联络开关、分支线开关、用户分界开关等进行监控的配电网自动化系统终端的总称。实际工程中，常将其称为 FTU (feeder terminal unit)。通常只需测控 1 台开关，采集 3 个相电流或 2 个相电流和 1 个零序电流，电压信号的采集根据电压互感器的配备情况处理。特殊情况下，需要测控同杆架设的 2 台开关，其输入/输出容量是单线路开关时的 2 倍。



柱上开关终端

柱上开关终端正常运行时由电压互感器供电，电源模块通常提供 24V 和（或）48V 直流电源，给终端本身、通信终端以及开关分合闸操动机构供电；配备蓄电池或超级电容储能，在线路停电时提供不间断电源。

柱上开关终端（见图）通常安装在户外柱上，通过二次电缆与开关内的电压/电流互感器（或传感器）、操作控制回路。机箱一般用防腐蚀材料（如不锈钢）制成，通风良好，具有完善的防尘、防雨、防潮以及防雷、防电磁干扰措施。在严寒地区使用时，可在机箱内配备电加热元件，以调节箱内温度，保证其在出现低温天气时正常工作。

zhuancha pinlü kongzhi sudu bihuan bianpin tiaosu

转差频率控制速度闭环变频调速 (variable frequency AC motor speed control by slip-frequency control with speed closed-loop)

利用转差频率控制定子电流和供电电源频

率实现交流电动机变频调速的技术。这是感应电动机变频调速的一种特有方法。

控制原理　如果感应电动机在小转差频率下工作，可认为转子回路功率因数等于 1，转子电流可近似写为

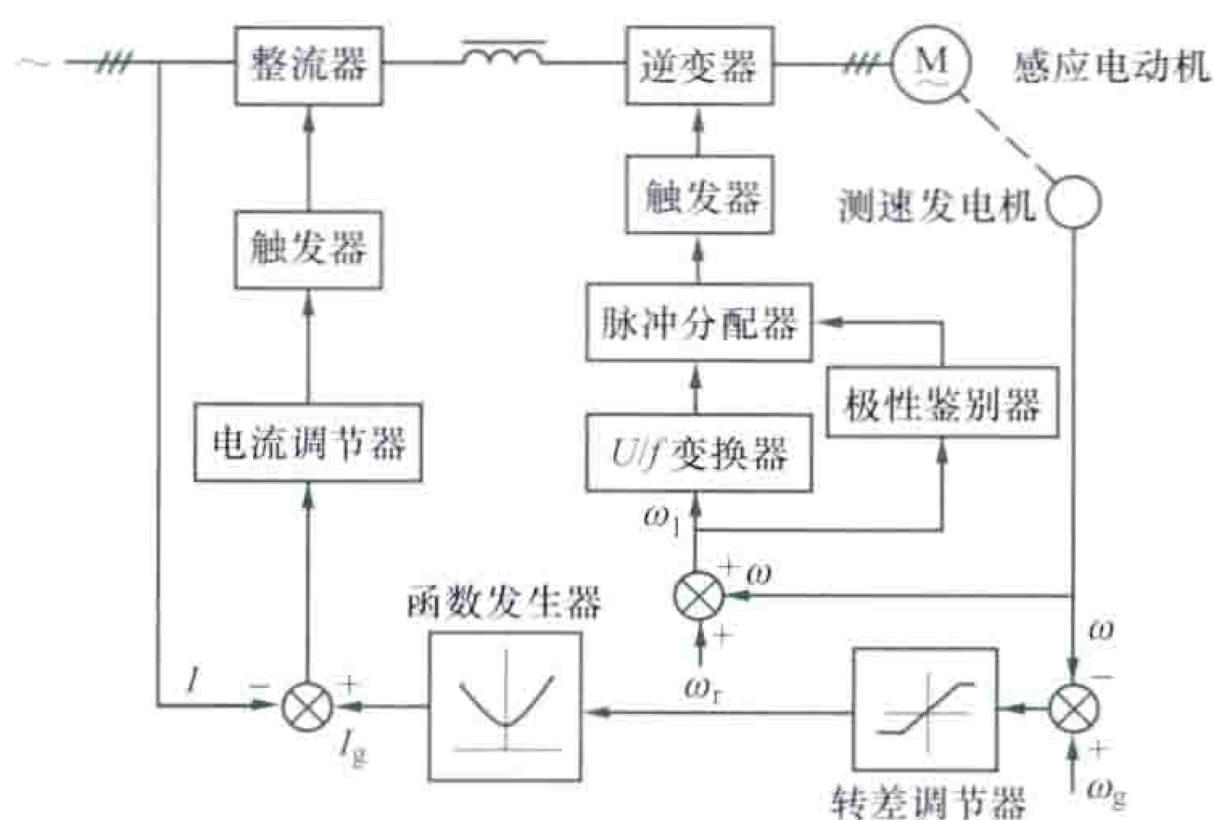
$$I_2 \approx \frac{sE_1}{r_2} = \frac{f_r}{f_1} \times \frac{E_1}{r_2} \propto \Phi_m f_r \tag{1}$$

式中 f_r 为转差频率；f_1 为定子供电频率；E_1 为定子绕组电动势；r_2 为转子回路电阻，对笼型感应电动机为一定值；Φ_m 为气隙磁通。式（1）说明：如果使转子电流与转差频率成正比变化，则磁通可保持不变。同时，在小转差频率下，电磁转矩为

$$T \approx C_T' \Phi_m I_2' \propto \Phi_m I_2' \propto \Phi_m^2 f_r \tag{2}$$

式中 C_T' 为转矩常数。式（2）表明：只要保持磁通不变，电磁转矩则正比于转差频率。控制转差频率即可调节电磁转矩，从而调节电动机的转速。可以用转差频率作为转矩的给定值，同时控制励磁电流，使气隙磁通保持不变。感应电动机的励磁电流是定子、转子电流合成磁通势的等值电流，而笼型感应电动机转子电流是无法控制的，因而只能通过单独控制定子电流来保持励磁电流不变，即保持恒定磁通。由于转子电流和转差频率成正比，在励磁电流一定的条件下，定子电流和转差频率也就存在近似的线性关系，因而可通过转差频率信号按这种近似线性关系控制定子电流，从而实现恒磁通调速。当然，也可以实现恒功率调速等其他运行方式，此时定子电流与转差频率之间的关系将发生相应的变化，在调速过程中，应控制定子电流满足这种新的关系。

控制系统　常用的转差频率控制速度闭环变频调速是交流-直流-交流电流型变频器与感应电动机组合的转速闭环调速系统，其框图如图所示。速度给定值 ω_g 与测速发电机反馈的实际转速信号 ω 相比较，其差值信号（$\omega_g-\omega$）通过转差调节器产生绝对转差信号 ω_r（$\omega_r=2\pi f_r$）。转差调节器环节中的特性表明其输出不仅能反映 $\omega_g-\omega$ 的符号，还能起到限幅作用，并能保证电动机在小转差频率下工作。输出的转差信号分为两路。一路通过函数发生器进入整流器控制回路。函数发生器的函数关系即上述的定子电流与转差频率间的近似线性关系，



转差频率控制速度闭环变频调速系统框图

如该环节方框内的特性所示（纵轴为定子电流，横轴为转差频率），其输出作为定子电流给定值 I_g，采用电流闭环后能保证定子电流完全按照上述规律变化，从而保证调速过程中磁通 Φ_m 不变。另一路与转速反馈信号相加得 $\omega_1=\omega+\omega_r$，作为逆变器输出频率设置值。通过 U/f 变换器变换为频率信号，再通过脉冲分配器形成逆变器的触发信号。极性鉴别器可根据算出的 ω_1 的正负极性，决定触发脉冲的相序，从而控制电动机的正反转向。对电动机进行调速，如减速时，可减小转速给定值 ω_g，则 $\omega_g-\omega$ 为负值（其最大值为限幅饱和值），通过频率控制回路使逆变器输出频率 ω_1 降为 ω_1'，由于转子转速不可能突变，致使 $\omega_1'<\omega$，电动机进入发电制动状态，电动机减速。电流控制回路则根据转差频率按照上述关系控制定子电流，保证调速过程中磁通 Φ_m 不变。当减速到电动机状态且电磁转矩与负载转矩平衡时为止。由于是恒转矩调速，其转差率和减速前的转差率相同。

在转差频率控制系统中，应特别注意转差频率测量的准确性。由于转差频率值是转矩的给定值，如测量值偏小或偏大，将导致 U/f 比值变化，使电动机带负载能力降低或磁路过饱和，对控制系统都是不利的。

特点及应用　转差频率控制速度闭环变频调速有以下特点：能保证电动机在小转差率下工作，调速系统可以在高功率因数、小转子电流、低转子损耗下获得最大的电磁转矩；在稳定时可以实现无差调节，有着优良的静态特性；急剧的动态变化过程中可以以最大转矩作为动态转矩自动实现四象限运行，也即有着良好的动态性能。它可以得到与晶闸管直流调速双闭环系统（见直流电动机调速）相近的静态和动态特性，是一种高性能的调速方法，因而可应用于性能要求较高的调速场合，但仍不如响应特性良好的矢量控制调速系统（见交流电动机矢量控制）。

参考书目

陈伯时，阮毅．电力拖动自动控制系统——运动控制系统．北京：机械工业出版社，2003．

zhuanju kongzhi

转矩控制　（torque control）　对电动机输出电磁转矩的大小和方向进行控制的技术。转矩控制是实现转速控制和位置控制等的基本组成部分，是生产机械对电力拖动控制系统的最基本要求。转矩控制分为直流电动机转矩控制和交流电动机转矩控制。

直流电动机转矩控制　直流电动机的电磁转矩方向由电枢电流的方向和励磁磁场的方向共同决定，只要改变其中任一个量的方向，就可改变电磁转矩的方向。而电磁转矩的大小由电枢电流的大小和励磁磁场的大小共同决定，只要改变其中任一个量的大小，就可以改变电磁转矩的大小。

交流电动机转矩控制　交流电动机的电磁转矩方向由电动机的供电电源相序决定。如果相序为 A—B—C，则电磁转矩的方向为从绕组 A 轴线至绕组 B 轴线、绕组 C 轴线的方向；如果相序为 A—C—B，则电磁转矩方向为从绕组 A 轴线至绕组 C 轴线至绕组 B 轴线。因此，只要改变供电电源相序，即可改变交流电动机电磁转矩的方向。交流电动机的电磁转矩值与定转子旋转磁场及其夹角有关。交流电动机的转矩控制可以分为感应电动机的转矩控制和同步电动机的转矩控制。

（1）感应电动机的转矩控制。在转子磁通恒定的前提下，感应电动机的电磁转矩与定、转子之间的转差频率成正比。因此可以通过控制感应电动机的转差频率来实现感应电动机的转矩控制。而为了保持转子磁通恒定，可以通过保持定子端电压和频率的比值恒定来近似实现。通过控制转差频率实现对感应电动机转矩控制的方法叫做转差频率控制。为实现感应电动机更准确的转矩控制，一般采用矢量控制和直接转矩控制两种方式。

矢量控制是把感应电动机的电压和电流等物理量通过坐标变换到同步旋转坐标系下，在该坐标系下感应电动机的电磁转矩由磁场矢量和电流矢量共同决定。改变磁场矢量的方向或者电流矢量的方向都可以改变电磁转矩的方向；改变磁场矢量的幅值或电流矢量的幅值，或磁场矢量和电流矢量之间的夹角都可以改变电磁转矩的大小。在矢量控制中，电流可以分为励磁分量和转矩分量，励磁电流分量的值决定了磁场的幅值，与磁场矢量相垂直方向上的电流分量称为转矩电流分量。感应电动机的转矩控制可以通过控制励磁电流和转矩电流来实现。（见交流电动机矢量控制）

直接转矩控制把转矩直接作为被控量，交流电动机电磁转矩的大小由转子磁链和定子磁链共同决定。控制定、转子磁链的幅值基本不变，要改变电磁转矩的大小，可以通过改变定、转子磁通间的夹角来实现。而转子磁通的旋转速度不会突变，因此转矩控制是通过改变定子磁通的旋转速度，从而改变定转子磁通的夹角，达到控制电磁转矩的目的。（见交流电动机直接转矩控制）

（2）同步电动机的转矩控制。同步电动机的电磁转矩由转子磁通和与转子磁通相垂直的方向上的定子电流分量共同决定。转子磁通的大小由励磁电流来决定，在永磁同步电动机中则由转子永磁体来决定。转子磁通的位置由转子机械位置来决定。因此同步电动机的转矩控制是通过控制与转子磁通相垂直的方向上的电流分量来实现的。同步电动机的转矩控制也可以通过矢量控制或者直接转矩控制来实现。

zhuanlu diankong xitong

转炉电控系统 （electric drive control system for converter） 用于实现转炉正常运转的电力拖动和控制等电路组合的总体。转炉可分为卧式转炉、立式转炉和转动式转炉。立式转炉已由纯氧顶吹式转炉发展到典型的底吹式和复合吹炼式转炉，转动式转炉以卡尔多转炉为代表。转炉及其周围处于高温和高粉尘的工作条件下，工况变化频繁，处于重载而频繁起动且常低速运行的工况。对转炉电力传动的要求是：起动平稳、起动转矩大、低速运行时机械特性硬。从电力拖动上看，转动式转炉与卧式转炉或立式转炉的主要区别是除有倾炉电控系统以外还具有炉体转动电控系统。

倾炉电控系统 包括主传动装置，事故传动装置，转角控制器及其运行、保护和故障处理等控制和操作联锁线路等。

主传动装置 包括电动机及其起动或调速装置。常用的电动机有绕线转子感应电动机、笼型感应电动机、直流电动机等，起动或调速装置有交流调速装置和直流调速装置，分为交流电控系统和直流电控系统。

（1）交流电控系统。转炉的交流传动装置有交流绕线转子感应电动机转子回路串接电阻调速和交流笼型感应电动机变频调速系统。

绕线转子感应电动机采用转子回路串接电阻的方法来限制起动电流和调节转速。这种系统比较简单、设备价格低，但机械特性软、速度不稳定、损耗大、效率低、平滑性差、调速性能差。一般采用直流电动机作为事故传动装置，其直流电源由蓄电池供电，蓄电池的电压等于或大于直流电动机的额定电压，容量按直流电动机运行15min选取。

笼型感应电动机变频调速系统将主传动和事故传动装置合二为一。正常时由厂区低压电网提供交流电源经交流-直流-交流型变频器向电动机供电；当交流电源失电时，由蓄电池提供的直流电源经变频器的逆变部分向电动机供电。

交流电控系统如图1所示。

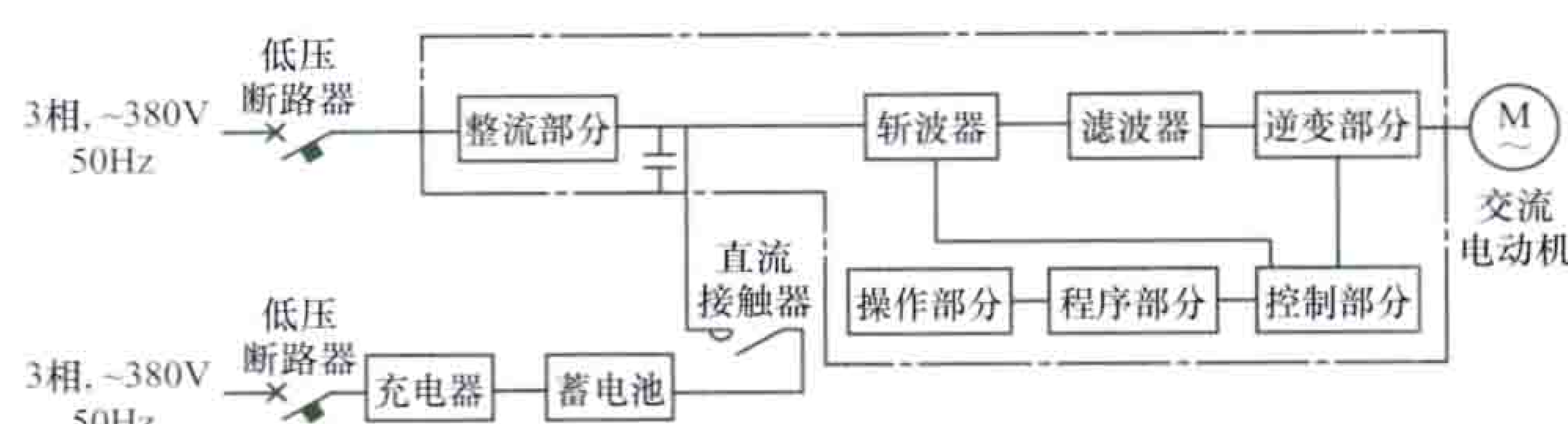


图1 交流电控系统

（2）直流电控系统。直流电动机传动装置是常用的传动方式之一，可将主传动和事故传动装置合二为一。

直流电动机的主回路串接电阻来限制起动电流和调节转速，这种系统比较简单、设备价格低，但调速性能差。

晶闸管变流器用于直流电动机的供电和调速。这种系统一般不设专用的整流变压器，直接由工厂低压配电网供电，在变流器的进线侧加装电抗器。正常由变流器向直流电动机供电，当交流失电时由蓄电池直接向直流电动机供电，如图2所示。

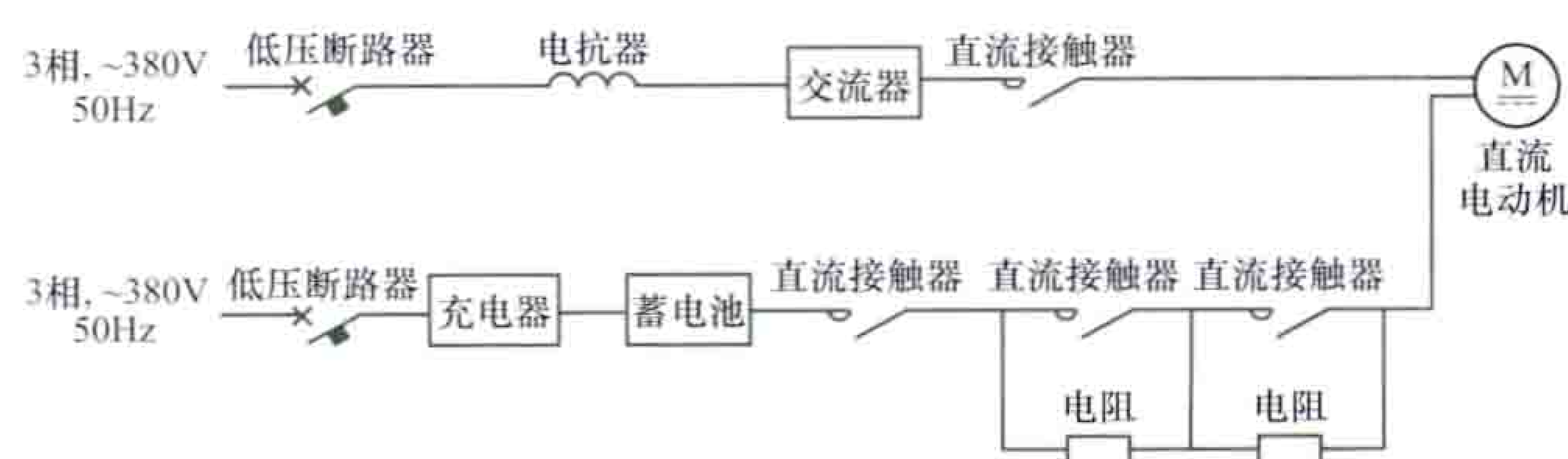


图2 直流电控系统

事故传动装置 主传动装置故障或工作电源失电时，用于将风口转出液面（卧式转炉）或提升氧枪（立式转炉和转动式转炉）的装置，以防止炉内熔融液灌死风眼，氧枪烧结或冻结在炉内，必要时将炉料排出。小型转炉的事故传动装置为手轮。大中型转炉的事故传动装置有气动式、液压式、直流电动机、逆变器。气动式或液压式装置中，因气动或液压元件多、维护工作量大，故较少使用。多数转炉用直流电动机或交流电动机加逆变器作为事故传动装置。事故传动装置的电源多为蓄电池。

转角控制器 实现转炉倾炉定位控制的重要设备，由角度检测传感器和运算与控制设备组成。角度检测传感器有主令控制器、自整角机、旋转编码器等，运算与控制多由可编程序控制器或工业控制机来实现。系统根据检测到的角度信号发出控制指令，控制传动装置的运行。卧式转炉一般有8～10个倾炉特征角，立式转炉和转动式转炉一般有4～5个倾炉特征角。

运行、保护、故障处理 运行、保护、故障处理等控制和操作联锁线路可以用继电器等来实现，也可用可编程序控制器或工业控制机来实现。

炉体转动电控系统 属于通用的直流或交流调速电控系统的范畴。根据冶炼工艺的变化，设置运行速度，一般为连续运行。

zhuansu kongzhi

转速控制 （shaft speed control） 能实现电动机加速、减速、起动、制动、正转、反转控制的技术。为满足生产机械的需要，电动机运行必然要进行转速控制。

原理 电动机之所以能在某一转速下稳定运行，是由于该转速下电动机的电磁转矩与负载转矩（包括生产机械的阻力转矩和电动机本身的空载阻力转矩）相平衡。要改变电动机的转速，必须改变电磁转矩与负载转矩相平衡的状态，即控制电动机的电磁转矩来实现转速控制。

当电磁转矩为驱动转矩，负载转矩为制动转矩，且电磁转矩大于负载转矩时，电动机将加速。加速的快慢完全取决于两转矩差值的大小，这种加速过程一直到它们重新达到新的平衡时为止，电动机将在加速后的某一新的转速下稳定运行，从而实现加速控制。当电磁转矩为驱动转矩，负载转矩为制动转矩，且电磁转矩小于负载转矩时，电动机将减速。减速的快慢完全取决于两转矩差值的大小，这种减速过程也一直到它们重新达到新的平衡时为止，电动机将在减速后的某一新的转速下稳定运行，从而实现减速控制。

当电动机转子处于静止状态，电动机接通电源施加驱动性质的电磁转矩，且其数值大于具有制动转矩性质的负载转矩时，电动机转子将离开静止状态而加速。加速的快慢仍取决于两转矩的差值，一直加速到两转矩处于平衡时为止，电动机将在该转速下稳定运行。电动机转子从静止状态到稳定转速的升速过程，称电动机的起动过程（见电动机起动）。起动过程的快慢由起动时间来衡量。电动机的起动控制意味着实现起动和控制起动时间。当电磁转矩变为制动转矩（电磁转矩方向与电动机转子转向相反）时，将迫使转子减速，直到转子停转为止；如果负载转矩为驱动转矩（如重物下放等），转速变化过程将延续到两转矩重新处于一种新的平衡时为止。电动机电磁转矩与转子转动方向相反时，进入电动机的制动过程（见直流电动机制动、交流电动机制动）。

在负载转矩确定时，电动机正常运行时转子的转动方向由电磁转矩的方向所决定。直流电动机的电磁转矩方向由电枢电流的方向和励磁磁场的方向共同决定，只要改变其中任一个量的方向，就可改变电磁转矩的方向，从而改变直流电动机转子的转动方向，即实现直流电动机正、反转控制。交流电动机的电磁转矩方向由电动机的供电电源相序决定。如果相序为 A—B—C，则电磁转矩方向为从绕组 A 轴线至绕组 B 轴线、绕组 C 轴线；如果相序为 A—C—B，则电磁转矩方向为从绕组 A 轴线至绕组 C 轴线、绕组 B 轴线。因此，只要改变供电电源相序，即可改变交流电动机的转向，实现其正、反转控制。

分类 根据生产机械对转速控制的要求，转速控制可分为有静差调速、无静差调速、可逆调速、不可逆调速、稳速控制和宽调速控制。

有静差调速 调速的精度用静差率（见电动机调速）来表示。图 1 所示为有静差直流调速系统框图，控制系统中控制电压是由给定量和反馈量比较后的偏差电压经比例放大（比例调节器作用）而得，这时只能依靠输出量与给定量的偏差来调节，故称为有静差调速。有静差调速适用于对调速精度要求不高的场合，其静态指标通常设计为：调速范围小于或等于 20，静差率大于或等于 10%。

无静差调速 控制系统中控制电压是由给定量和反馈量比较后的偏差电压经积分放大（比例积分调节器作用）而得，当偏差电压为零时，对应的控制电压为定值，从而确保电动机转速等于给定转速，实现无静差调速。无静差调速可以应用于对静差率要求小于或等于 10% 的场合。图 2 所示为无静差直流调速系统框图。

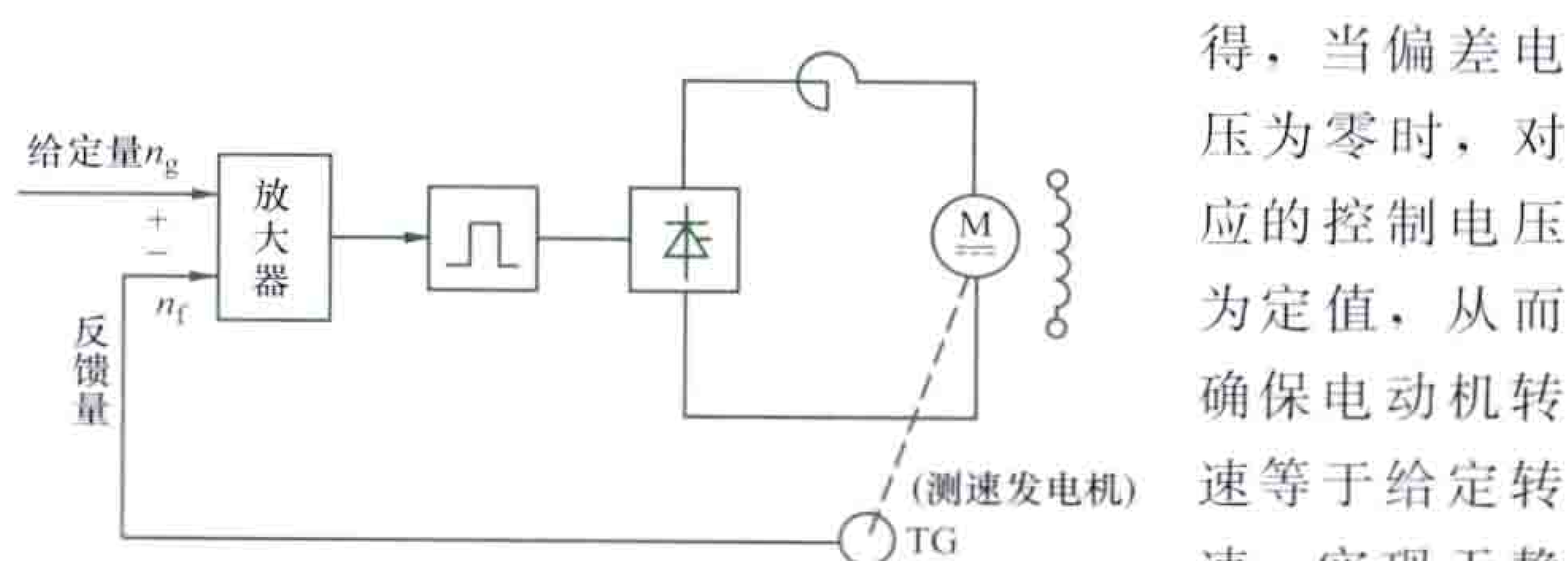


图 1 有静差直流调速系统框图

可逆调速 在实际生产中，有许多生产机械不仅要求电动机能够起动和平稳调速，有时还要求电动机能够快速反转和停车。如龙门刨工作台的往返运动，电力机车的前进、后退，纺织印染生产中的探边机构等。电动机的这种快速正反转运行称为可逆运行。实现电动机可逆运行的调速称可逆调速。图 3 所示为用晶闸管切换的直流传动可逆调速原理接线图。该线路通过改变电枢电流方向实现电动机的可逆调速。

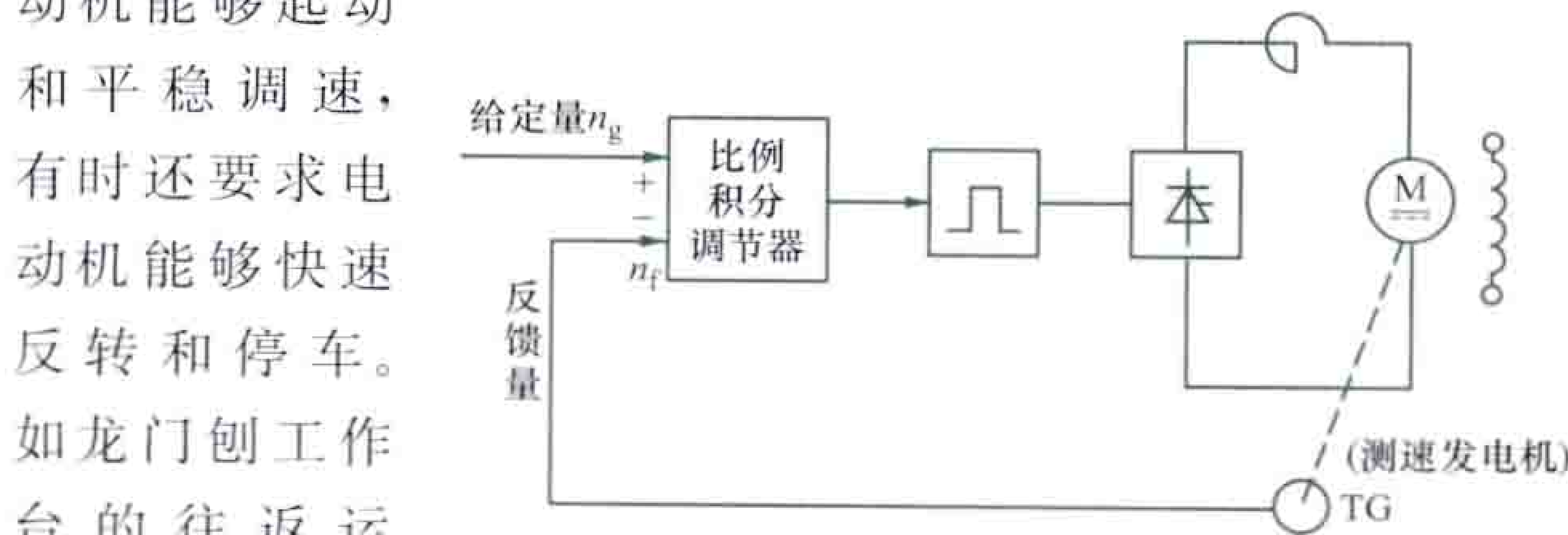


图 2 无静差直流调速系统框图

不可逆调速 只能实现电动机单方向运转的调速。不可逆调速只适用于单方向运转的生产机械。

稳速控制 某些生产机械要求在各种扰动下以一定的稳速精度长期稳速运行时的电气传动控制。例如中型抄纸机、风洞、橡胶压延机等要求的稳速精度为 0.2%～1%；高速纸机、微电机测试设备、超音速风洞等要求的稳速精度为 0.01%～0.1%。（见稳速控制）

宽调速控制 生产机械在额定负载下要求的运行转速有最高转速和最低转速，两者之比称为调速范围（又称调速比）。不同的生产机械，对调速范围的要求也不同。如中型和大型龙门刨床主传动要求的调速范围为 10～20，进给传动要求的调速范围为 30～50；中型和重型立式车床主传动要求的调速范围为 50～1000 或更大，进给传动要求的调速范围为 1000 或更大；轧钢机要求的调速范围为 3～120。当要求的调速范围大于 100 时，称宽调速控制。

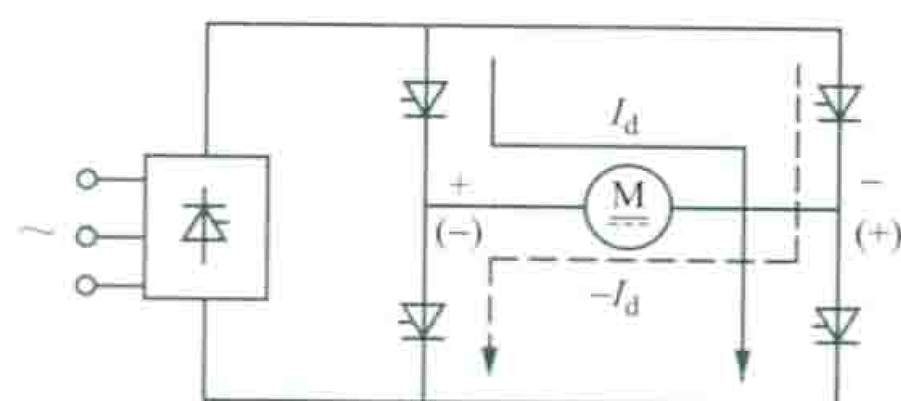


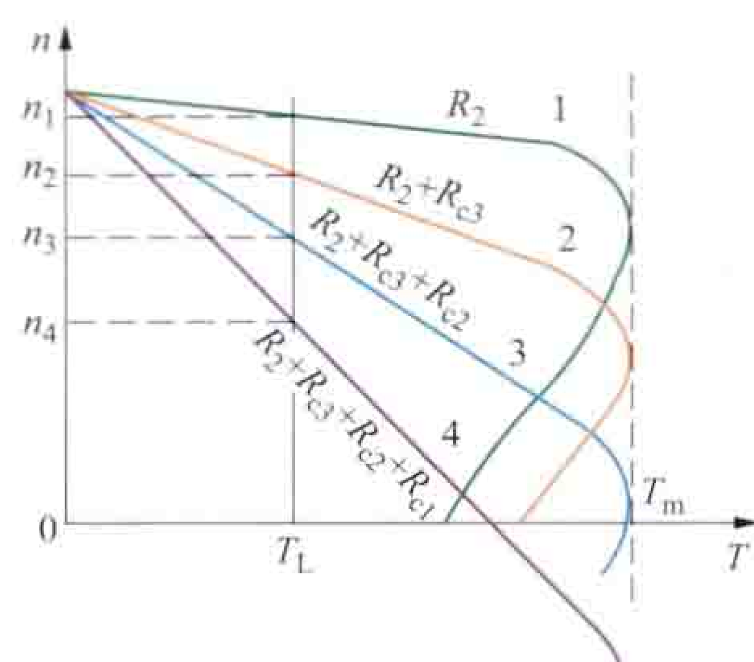
图 3 用晶闸管切换的直流传动可逆调速原理接线图

zhuanzi chuandianzu jiaoliu tiaosu

转子串电阻交流调速 （AC motor speed control by rotor resistance） 改变绕线转子感应电动机转子回路中外串电阻阻值实现调速的技术。这种调速方法实质上属于调节转差率一类（见交流电动机调速）。由于笼型感应电动

机转子回路是闭合的笼型导条，不能外串电阻，因而这种调速方法只适用于绕线转子感应电动机。

图中示出了绕线转子感应电动机转子回路中串入不同阻值附加电阻的转矩-转速特性。曲线1为转子回路中未串电阻时（R_2 为转子绕组电阻）的特性曲线；曲线2为转子回路中串入电阻 R_{c3} 时的特性曲线；曲线3为转子回路中串入电阻 $R_{c2}+R_{c3}$ 时的特性曲线；曲线4为外串电阻 $R_{c1}+R_{c2}+R_{c3}$ 时的特性曲线。对恒转矩负载 T_L 而言，电动机转速分别为 n_1、n_2、n_2、n_4。特性曲线上所对应的外串电阻值依靠调节变阻器来实现，从电阻 $R_{c1}+R_{c2}+R_{c3}$ 依次切除 R_{c1}、R_{c2}、R_{c3}，即可得到相应的转速。如果在调速时保持转子电流为恒定值，则调速前后的转子电阻与转差率的比值保持不变，电磁转矩亦保持不变。可见，转子回路串电阻是一种恒转矩调速方法。



绕线转子感应电动机转子串电阻调速特性曲线

转子串电阻交流调速方法简单，易于实现。其主要缺点为：① 调速范围不大。其速度上限是电动机额定转速，下限则受容许的静差率限制，实际调速范围一般为（2～3）：1，最大不超过10：1，轻负载时的调速范围将更小。②转子所串电阻体积笨重，又要消耗一定功率，致使效率降低，特别是低速时效率很低。至于调速的平滑性问题，如果电阻靠抽头调节，则调速平滑性不好；如果利用电子线路对转子串接电阻进行连续通断切换，则可实现无级调速。转子串电阻交流调速多用于断续工作方式的生产机械上，其低速运转时间短，静差率要求也不高，如起重运输机械、交流卷扬机等。

zidong chongheqi

自动重合器 （automatic circuit recloser） 一种自身具有控制与保护功能的配电开关设备。其功能为开断短路电流后自动重合，重合不成功后再次开断、重合，连续重合一定次数（一般为3次）不成功即自动闭锁，不再重合并掉牌显示，其后必须手动将其关合。自动重合器通常还配有接地故障保护。

用途　自动重合器可装在电杆上、构架上或地面基础上。最适宜装在负荷沿线分布的中压架空配电线路的较长干线和较大分支线上，起分段保护和隔离作用。也可装在变电站内，作为中压配电馈线的主保护开关设备。

工作原理　自动重合器有快、慢两种安秒特性曲线可供选择，一般快速特性曲线只有一条，慢速特性曲线可以有多条。第一次开断按快速安秒特性曲线整定，以后各次开断则根据保护配合需要选择不同的安秒特性曲线，称之为双时性。自动开断后到下次重合的时间间隔称为重合间隔，可在1～60s的范围内整定。每一次操作程序可选择1～4次开断。在选定的操作程序完成以前自动重合成功时，其控制系统即自动复位。这样，当线路再次发生故障时，将重新按完整的操作程序动作。自动重合器易于与分断器、熔断器进行保护配合，以缩小故障停电范围，提高供电可靠性。

主要类型和特点　自动重合器分单相、三相两种，一般采用三相重合器。额定电压一般为10～35kV，最高为69kV。额定短路开断电流一般为6.3～20kA。控制方式有液压式、电子式两种。灭弧介质有绝缘油、真空、SF_6 3种。绝大多数自动重合器为电磁机构合闸，弹簧储能分闸。传统的电磁机构合闸线圈通过两个辅助触点并接在安装地点被保护的运行线路上，正常时，合闸线圈不带电；接到合闸指令后，辅助触点闭合，合闸线圈与线路运行电压接通，由线圈铁芯操动合闸机构。而永磁操动机构结构简单且所需合闸功小，其操作不需要高压电源，合闸线圈采用蓄电池利用线路电压互感器或者外引低压电源充电。合闸过程中给分闸弹簧储能，合闸完毕后辅助触点自动断开。液压控制重合器的分闸线圈串联在主回路中，线路过流时由分闸线圈直接释放分闸弹簧，操动分闸机构。电子控制重合器的分闸线圈独立于主回路，线路过电流时，由控制电路导通直流分闸回路，使分闸线圈带电，释放分闸弹簧。

历史与展望　自动重合器自20世纪30年代问世，在传统的油或空气作绝缘介质的柱上断路器加装自动控制装置，价格昂贵，难以推广。进入20世纪80年代，由于真空和 SF_6 断路器的出现，加上电子技术的发展，用户对供电可靠性要求的不断提高，自动重合器的应用日趋广泛，适用于小型化、无油化、免维护和智能化以及环保要求高的场所。一些自动重合器采用了将真空灭弧室置于环氧树脂制的外壳内的绝缘结构，不用油和气体等绝缘物质，采用永磁操动机构以简化结构，配置了功能很强的电子式保护装置和遥测、遥控装置以及通信接口，可以与分段器配合使用，实现架空配电线路的馈线自动化。

zidong fenduanqi

自动分段器 （automatic line sectionalizer） 一种装在配电线路上能够记忆通过故障电流次数，并在达到整定次数后，在无电压或者无电流条件下自动分闸的开关设备。自动分段器一般具有关合短路电流及开断与关合负荷电流的能力，但无开断短路电流的能力。通常与具有开断和重合短路电流功能的自动重合器等开关设备配合使用，起线路自动隔离、分段的作用。自动分段器从20世纪50年代诞生以来，与自动重合器同步发展，适用于线路长、分支多的架空配电线路实施配电自动化。

分类和工作原理　自动分段器分单相、三相两种，额定电压为10～35kV。控制方式有液压式、电子式两类，某些自动分段器还可按动作原理分为跌落式、重合式和组合式等，灭弧介质有绝缘油、真空、SF_6 和空气4种。

自动分段器配有控制系统、电源、信号机构和操动机构，能实现按功能设计要求分、合闸和向配电网的控制调度中心传送分合信号。例如，常用的自动分段器的负荷侧线路发生短路故障时，它能记忆上级开关设备开断短路电流的次数，并在达到整定的计数（1～3次）后，在上级开关设备开断短路后的0.25s时间内自动分闸，隔离故障区段，保证上级开关设备再次重合成功，使其他无故障线路正常供电，同时掉牌或者跌落显示，便于事故处理人员确认故障区段。若在达到其整定的计数前，上级开关设备重合成功，自动分

段器的记忆系统能在一定时间内自动消零，以备下次重新计数。自动分段器分闸、闭锁并掉牌或跌落后，需手动将其关合。

使用注意事项　使用自动分段器须注意：①自动分段器的起动电流应为上级保护最小分闸电流的 80%以下；②整定的计数至少应比上级保护整定的开断次数少一次；③记忆时间必须长于上级保护动作的总累计时间；④自动分段器可以串接使用，但前后级分段器在整定计数上应有区别。

zidong fenjie kaiguan

自动分界开关　(automatic demarcation load switch)

装设在中压配电线路与用户进户线的责任分界点处，能准确检测、识别并快速隔离分界点后用户故障的自动开关，俗称看门狗开关。自动分界开关能与馈线断路器或重合器可靠配合，自动隔离用户内部故障，用户界外故障不动作，实现故障的快速定位、快速恢复非故障线路和用户的供电，显著提高了供电可靠性。

工作原理　自动分界开关是配有专门故障监测、保护控制和通信功能的一种自动负荷开关，能关合额定短路电流、关合和开断额定负荷电流及单相接地电流，但不能开断短路电流。开关内部除装有三相电流互感器外还装有零序电流互感器，既能检测相间故障电流，又能检测单相接地电流，以准确识别是用户界内故障还是界外故障。保护控制器根据检测电压、电流量和整定值，按照设置的动作逻辑控制开关动作：当用户界外发生故障时开关不动作；在用户界内发生相间短路故障、开关流过短路电流时，开关保持大电流合闸并闭锁状态，避免误开断相间短路电流，当线路前端重合器或断路器开断短路电流后，自动分界开关能与之配合，在无电压下开断并与外部线路隔离；当用户界内发生单相接地短路时，开关迅速开断并自动隔离故障。自动分界开关配套有通信功能，能将开关状态、用户负荷等信息发送至配电自动化主站。

结构和性能　自动分界开关由开关本体、控制器组成，有的采用外置电压互感器提供电压量和控制电压，内置三相电流互感器和一只零序电流互感器。开关可以手动或者自动分、合闸，其安装形式有架空线路安装和开关柜内安装两种，额定电流一般为 630A，额定短时耐受电流一般为 16kA 或 20kA。应用注意事项有：①开关短时耐受电流额定值应大于安装地点最大短路电流值；②只能装于分支线或者末端线路上，不能串接使用；③使用时应根据配电网中性点的不同接地方式，正确选择开关类型和整定开关定值，以便与电源侧断路器正确配合。

zidong zhuanhuan kaiguan

自动转换开关　(automatic transfer switching equipment)

在两路电源供电的线路中，当常用电源发生故障时，能将负载电路从常用电源自动转换到备用电源的开关电器，又称为双电源开关。自动转换开关广泛应用于医疗、金融、通信、机场、商务大楼、大型商场、体育场、工业生产及军事设施等重要供电场所，以及建筑消防供配电等，以确保重要负荷连续、可靠运行。

特点　自动转换开关（见图）由机械转换开关和电子控制器组成。机械转换开关具备很高的抗冲击电流能力，并且可频繁转换；具有可靠的机械联锁，确保在任何状态下两路电源不会并列运行；不允许带熔丝或脱扣装置，以防自动转换开关因过载造成输出端断电现象；带中性线的自动转换开关应具备中性线先合后分的功能，防止在切换时，由于不同系统中的中性线上电位漂移，使电流走向不一致或分流，造成剩余电流动作保护器误动作。电子控制器采用微处理器和集成芯片，具有较高的检测精度和较宽的参数设定范围（电压、频率、延迟时间），并具有必要的状态显示，以满足不同负载的要求；具备良好的电磁兼容性，能承受主回路的电压波动、浪涌电压、谐波干扰、电磁干扰等影响；转换时间快，且延时可调；可为用户提供各种信号及消防联动接口、通信接口。



自动转换开关

分类　按照短路分断能力分为 PC 和 CB 两个级别。PC 级自动转换开关具备双电源自动转换功能，不具备短路电流分断（仅能接通、承载）功能。CB 级自动转换开关同时具有双电源自动转换功能和短路电流保护（能接通并分断）功能。

zizhengjiaoji

自整角机　(synchro; selsyn)

发送、接收、转换角位移信息的交流控制电机。它是自整角发送机、自整角接收机、自整角差动发送机、自整角差动接收机和自整角（控制）变压器的总称。它可用于测量远距离机械装置的角度位置，也可以控制远距离机械装置的角度位置，还可以在随动系统中用作机械设备之间的角度联动装置，以实现自动整步控制。

自整角机可将机械角度变为电信号进行传送，也可将接收到的电信号直接或间接变换为机械角度显示。自整角发送机和自整角接收机在结构上基本相同，有单相交流励磁绕组和三相整步绕组，通常为一对极。磁极可做成隐极式或凸极式，可为转子也可为定子。整步绕组接成星形，两机同名相的端子相互连接。根据控制系统的需要，发送机和接收机除可单机成对使用外，还常多台组合使用。一台发送机可同时发送到数台接收机，将一台机械的角位移信号传送到几处进行指示或联合控制。或两台发送机送到一台接收机，以测量两台机械的转角差或和，即进行角度的加减运算，从而实现多机联动控制。

自整角机按输出量不同可分为力矩式和控制式；按测取单轴的角位移或是两轴的角位差，可分为普通式和差动式；按有无电刷又可分为有刷式和无刷式。此外，还有多极自整角机（极对数大于 1 的自整角机）、双通道自整角机（单对极和多对极自整角机的组合）、多线自整角机（输出线数大于 3 的自整角发送机）等。力矩式和控制式自整角机适用于随动系统中位移指示装置。前者精度低，带负载能力低；后者精度高，带负载能力大。它们都只能让接收机跟随发送机整步旋转。差动式自整角机不仅能指示两台机械的相对角度位置差，还能根据控制系统的要求使两台机械保持

固定的角度差。

力矩式自整角机　可用于力矩式自整角机系统（当多个自整角机转轴之间存在相对角位移时，将产生力矩，并力图使此相对角位移减至最小的自整角系统）。其发送机和接收机的励磁绕组接同一交流电源，电路如图1所示。接收机能产生整步转矩。交变的励磁电流在电动机中产生脉振磁场，与整步绕组相链并感生出时间相位相同的感应电动势。各相电动势的大小由其励磁绕组之间的角度确定。当发送机和接收机的转子失步时，两者的脉振磁场在它们的整步绕组上各自感应时间相位相同的三相电动势。由于定子各相绕组的轴线与转子绕组轴线在空间的相对位置不同，因此，对应线间电动势不相等。在对接的两定子绕组回路中流过电流形成合成磁场，并与两励磁绕组的脉振磁场作用产生电磁转矩（又称整步转矩），在该转矩的作用下，使两个转子向失调角$\theta=\alpha-\beta$减小的方向旋转，当$\theta=\alpha-\beta=0$时，整步转矩等于零，达到平衡。由于发送机的转子与受控机械（主动轴）相连，不能自由转动，只能使接收机跟随发送机旋转。当接收机转子与发送机转子的相对位置相同时，即旋转至$\theta=0$时，两机各对应相感应电动势的大小相等、方向相反，各回路的电流等于零，整步转矩等于零，达到平衡。

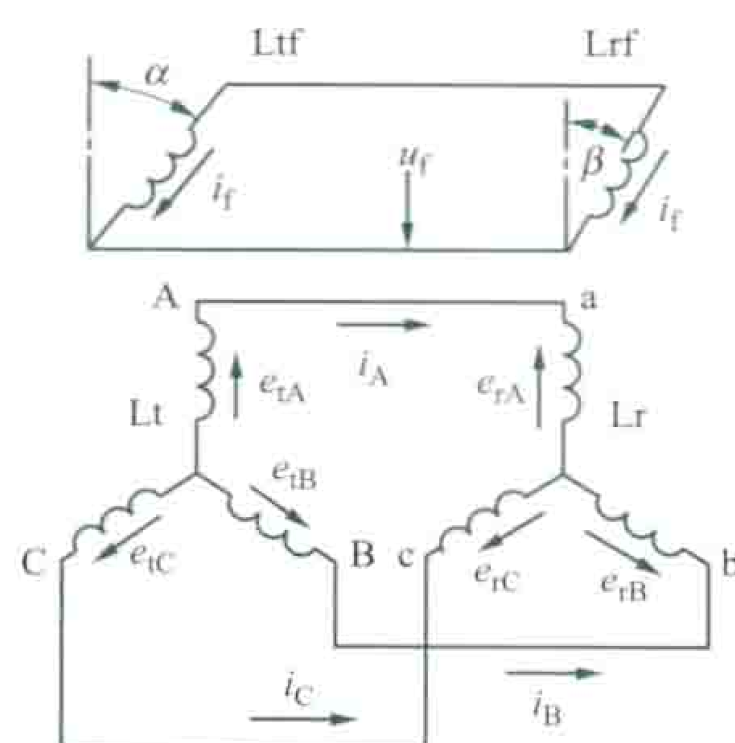


图1　力矩式自整角机电路图
Ltf—发送机的励磁绕组；
Lrf—接收机的励磁绕组；
Lt—发送机的整步绕组；
Lr—接收机的整步绕组

控制式自整角机　可用于控制式自整角机系统。其接收机不接电源，不能产生转矩，转子自己不能转动，作用原理与变压器相似。控制式自整角发送机的结构形式基本上与力矩式自整角发送机相似，磁极可做成凸极式或隐极式，通常磁极在转子上，为单相励磁。励磁绕组的匝数较多，空载输入阻抗较大，同时磁通密度较低。控制式自整角机输出绕组轴线与发送机励磁绕组轴线相差90°电角度。

控制式自整角机电路如图2所示，发送机T和接收机R的三相整步绕组分别为Lt和Lr，将它们对应的端子相连接。发送机的励磁绕组Ltf接单相电源u_f。接收机的转子绕组不接电源，而输出信号电压u_s，所以Lrs称为输出绕组。控制式自整角机输出绕组轴线与发送机励磁绕组轴线相差90°电角度。

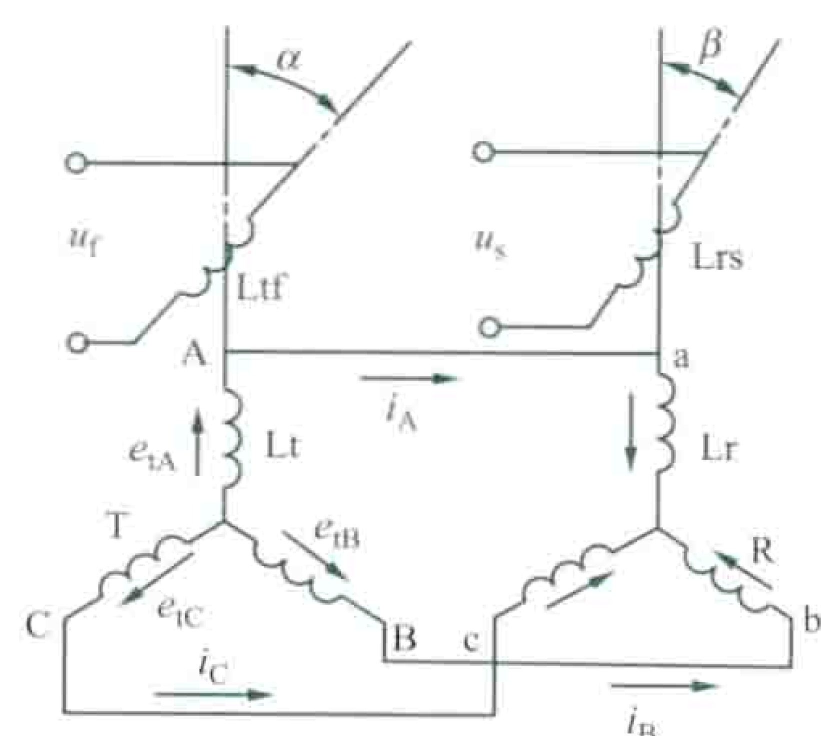


图2　控制式自整角机电路图
Ltf—发送机的励磁绕组；
Lrs—接收机的输出绕组；Lt—发送机的整步绕组；Lr—接收机的整步绕组；T—发送机；
R—接收机

当发送机接交流电压u_f时，将在三相整步绕组Lt中产生感应电动势，由于接收机不接电源，其整步绕组Lr中不产生感应电动势。两机整步绕组的电流由发送机的感应电动势产生。在Lt中产生的合成磁场即为脉振磁场，其轴线与励磁磁场相同。流入Lr中的电流与Lt中的方向相反，产生的合成磁场的方向也相反，大小则相等。接收机整步绕组磁场将在输出绕组中感生电动势，其大小与两机转子的相对角度有关。两机转子的偏转角一致时，在Lrs中感生出最大电动势，而当两转子偏转角相差90°时，感应电动势（为直轴电动势）等于零。在一般控制系统中，希望在从动轴与主动轴整步时接收机不输出电压信号，而当出现失步时才要求输出信号去起动从动轴的驱动电动机追随主动轴，为此，常以交轴电动势作实际的输出信号。

差动式自整角机　定、转子均为三相分布绕组，并接成星形。转子均为隐极式，三相绕组接三个集电环并经电刷引出。差动式自整角机的接线方式是将差动式自整角机插接在两台普通的自整角机之间，将其定、转子三相绕组分别与两台普通自整角机的整步绕组连接，接收机产生的整步转矩（力矩式）或输出电压（控制式）随两台发送机的相对角度而变化，从而测量或控制随动系统中两台机械的相对转角。

自整角（控制）变压器　当多个自整角机转轴之间存在相对角位移时，自整角（控制）变压器将产生相应的电信号，该信号经放大器供给伺服电动机，驱动负载并将相对角位移减至最小。

它接收自整角发送机（或差动发送机）的电信号，输出一个正比于自整角发送机（或差动发送机）角位移和自身角位移之差正弦函数值的电压，是控制式自整角机系统的接收机。由于在变压器状态下运行，故称自整角（控制）变压器。转子上装单相绕组，称为输出绕组，定子上装三相对称星形连接的整步绕组，并与发送机的三相整步绕组对接。输出绕组不接电源而接输出放大器。与变压器作用相似，自整角（控制）变压器只输出电压信号，不产生转矩，根据发送机、接收机的失调角，产生相应的电压信号经过放大器放大后送到伺服电动机的控制绕组，使伺服电动机转动并经齿轮箱减速器带动负载和自整角（控制）变压器的转子，直至发送机和接收机两转子间的失调角$\theta=0$。

zonghe ziyuan guihua

综合资源规划　(integrated resource planning, IRP)

一种把电力需求侧资源与电力供应侧资源同等对待的资源规划方法，又称最小成本电力规划。综合资源规划的目的是通过高效、经济、合理地利用供应侧和需求侧资源潜力，在保持能源服务水平的前提下，使整个规划的社会总成本最小。综合资源规划的资源选择通常有传统公用电厂、独立发电厂、外购电力、热电联产、可再生能源资源、输配电系统节能改造和需求侧管理等。综合资源规划的主要优点是资源选择灵活、风险低，且能减少环境污染、降低成本费用。

特点　①考虑了广泛的资源，扩大了规划方案的可选范围。资源包括大型发电厂发电、用户自备电厂发电、清洁能源发电、负荷管理、节电以及电力交换与购买等。②就电力规划过程中各方面的相互作用给出明确评价。不同的供应规划方案对电价有不同的影响，进而会影响实际的电力负荷，再影响需求和供应方案的成本与效益。③在估算和选择技术潜力时考虑了更多的成本构成，包括环境和社会成本。规划方案的成本和效益应从各参与方（电力用户、电力供应企业、设备供应商等）及未参与方（电力用户、服务中介机构

等）等全社会角度进行分析，规划方案的实施需合理协调各参与方的付出和应获得的利益，以激励各方主动参与需求侧管理。

内容　包括负荷预测、需求侧规划、供应侧规划和最佳资源规划，见图 1。

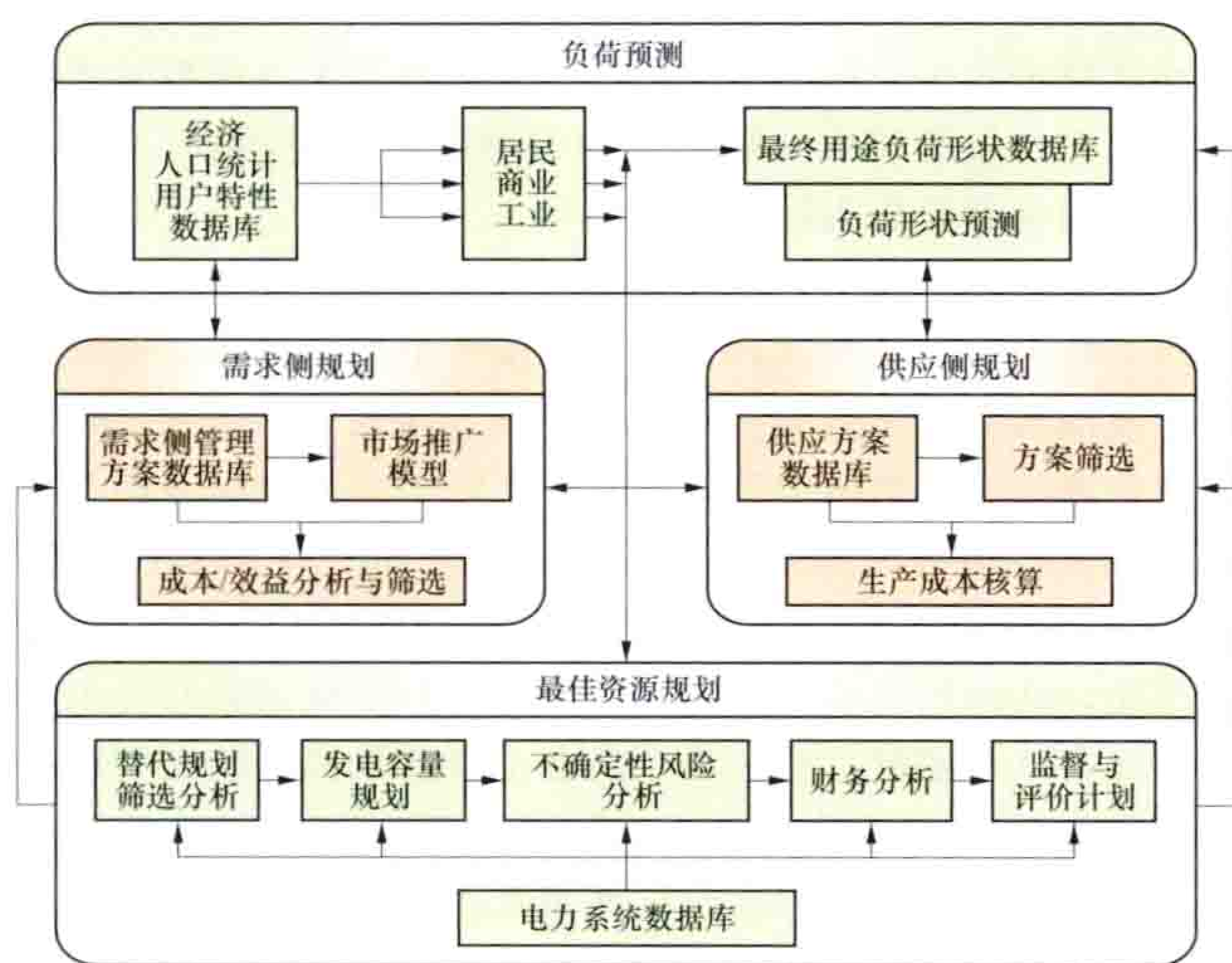


图 1　综合资源规划系统框架

（1）负荷预测。预测规划地区未来的电力需求，包括售电量和负荷形状。（见配电网负荷预测）

（2）需求侧规划。规划地区的需求侧管理方案。通常步骤为：①鉴别和筛选需求侧管理备选方案；②估计参与者（用户）对规划期电力需求的影响；③制定成本有效的需求侧管理实施方案；④估计需求侧管理方案的市场渗透率和市场潜力，预计电力用户的可接受性；⑤评估需求侧管理方案的成本与效益，选择有竞争力的需求侧管理资源。

（3）供应侧规划。确定最小成本且保持足够可靠性水平的电力供应方案，以满足净负荷需求预测值。供应侧规划包括：①常规电源供电方案，包括矿物燃料蒸汽机组（煤、石油及天然气）、核电机组、燃气透平机组和联合循环机组及水电等。②新能源供电方案，包括燃料电池、地热、风力及太阳能发电等。③改善原有系统及设备运行方案，包括延长现有机组的役龄、热电联产、外购电力和改善输配网等。

（4）最佳资源规划。综合负荷预测、需求侧规划和供应侧规划，确定最佳资源规划。常用的做法是先选定一组包括供应侧资源及需求侧资源的核心方案，作为所有资源规划方案的基本构成，根据规划目标相继综合其他方案进行评价和比较，最后确定核心方案组。评价比较过程包括：①不确定性风险分析。评价规划方案的抗风险能力。通常的方法是敏感性分析、决策分析及蒙特卡罗模拟。敏感性分析用于确定对年收入要求和信贷率最为敏感的变量。决策分析则对一些不确定变量赋予相对变化的范围及概率，然后计算收入要求及其他决策变量期望值的现值。蒙特卡罗模拟即随机抽样或统计试验的方法，以概率模型为基础，从已知概率分布抽样，建立不确定量的估计量。②规划方案选择。根据详细评估和不确定性风险分析的结果，选出一套或多套规划方案，指定其中一套为主方案，其余作为备用方案。对选出的方案进行灵活性测试，衡量最小成本资源规划中的每一主要部分的相对效益大小和风险。③财务分析。分析电网企业或发电企业以合理的利率筹措资金支持建设项目的能力，以及项目建设所需费用的多少、费用的使用方式等。目的是保障整个规划期间的财务完整性。

综合资源规划方法　一般有需求侧管理扣除法、迭代法和联立法。

（1）需求侧管理扣除法。基于供应侧方案时的边际成本来选择成本效益可行的需求侧管理方案，然后在负荷预测中扣除需求侧管理措施引起的负荷变化量，再重新规划供应侧方案。这是一种静态分析法，具有简单、易掌握的优点，流程见图 2。但当需求侧管理规划的规模较大时，这种方法就过于简单，它忽视了供应侧与需求侧的相互影响，忽视了电价的反馈作用。

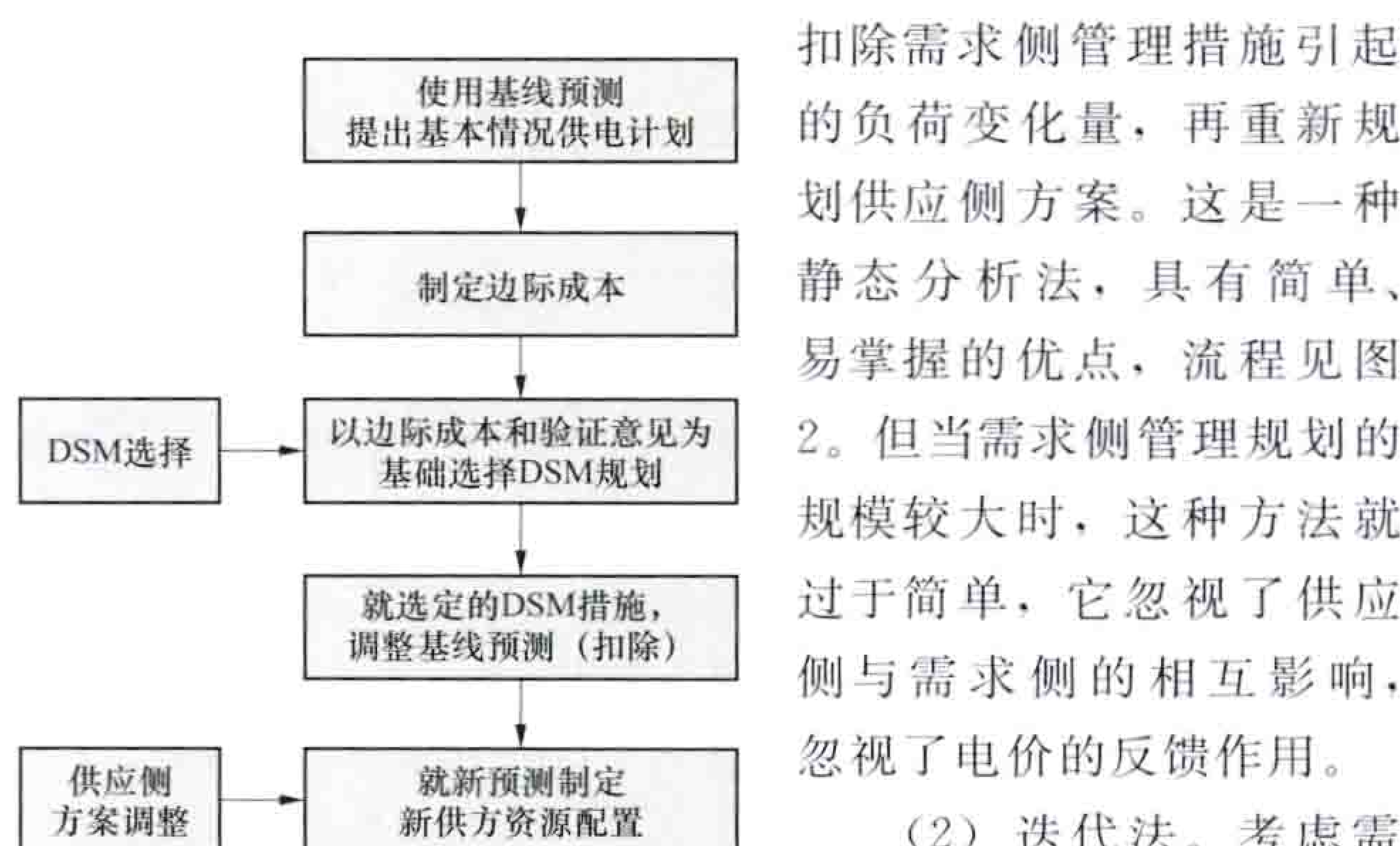


图 2　需求侧管理扣除法流程

（2）迭代法。考虑需求侧与供应侧的相互影响并进行反复计算的方法。迭代法流程见图 3。迭代过程：①根据成本效益分析结果选择合理的需求侧管理方案，与供应侧方案组合，求得综合资源方案的边际成本，反复优化后得到最佳组合。②计算资源选择的电价影响，以不同的电价评价需求侧管理方案并重新优化资源配置，从而对电价影响进行再评价。③重复上述过程，直到在新资源选择配置中不再有变化。迭代法的优点是可以真正建立最小费用资源配置，且资源费和电价影响也参与了估价；缺点是比较费时。

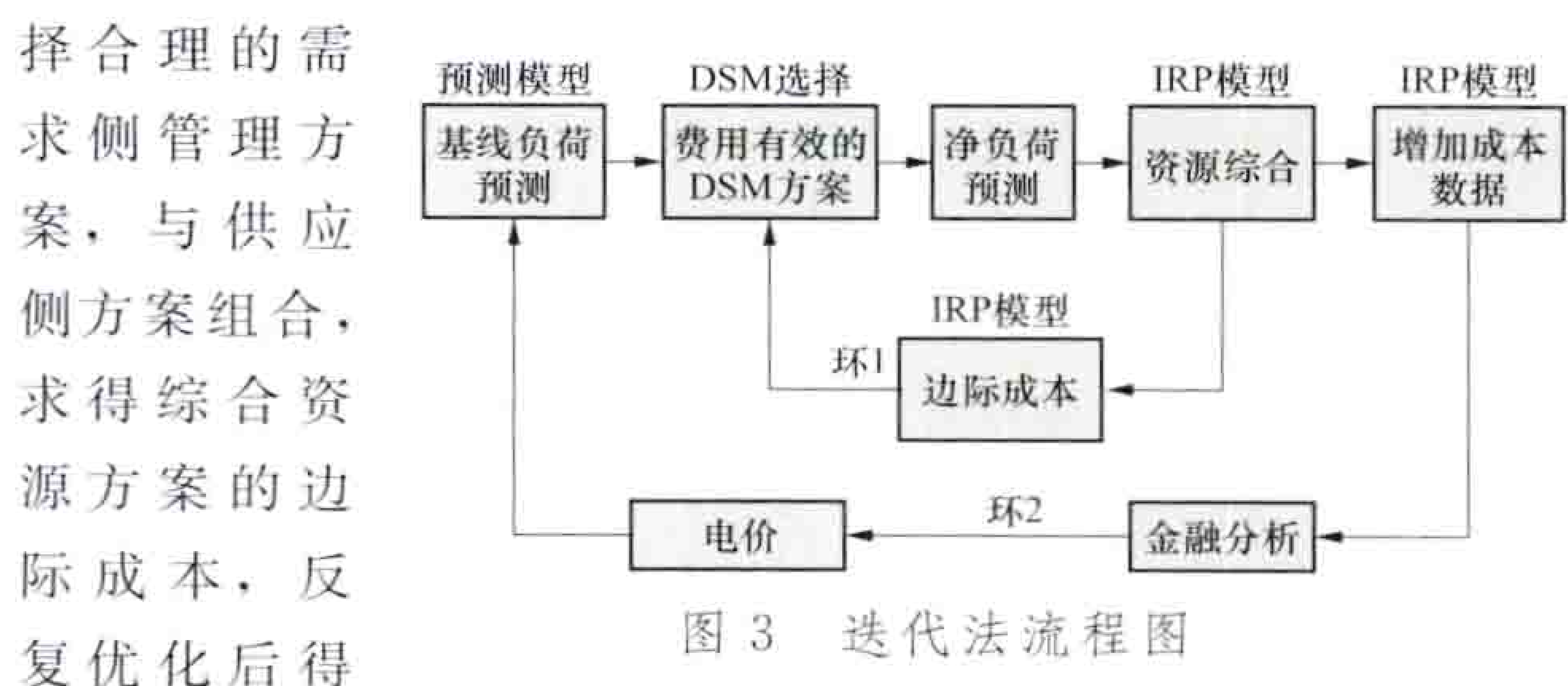


图 3　迭代法流程图

（3）联立法。应用综合资源规划模型，通过供应侧和需求侧资源的直接分析和比较，评估综合资源规划方案的可操作性和可靠性。这是一种动态分析法，流程见图 4。联立法的优点：①能够直接评估需求侧管理的规模和时限；②除了成本之外，其他判据都被结合到分析中去；③能够快速完成技术要求和分析。缺点：①需要需求侧管理的详细资料和复杂的能源计算模型；②对每个需求侧管理选择都进行分析，费钱且费时。

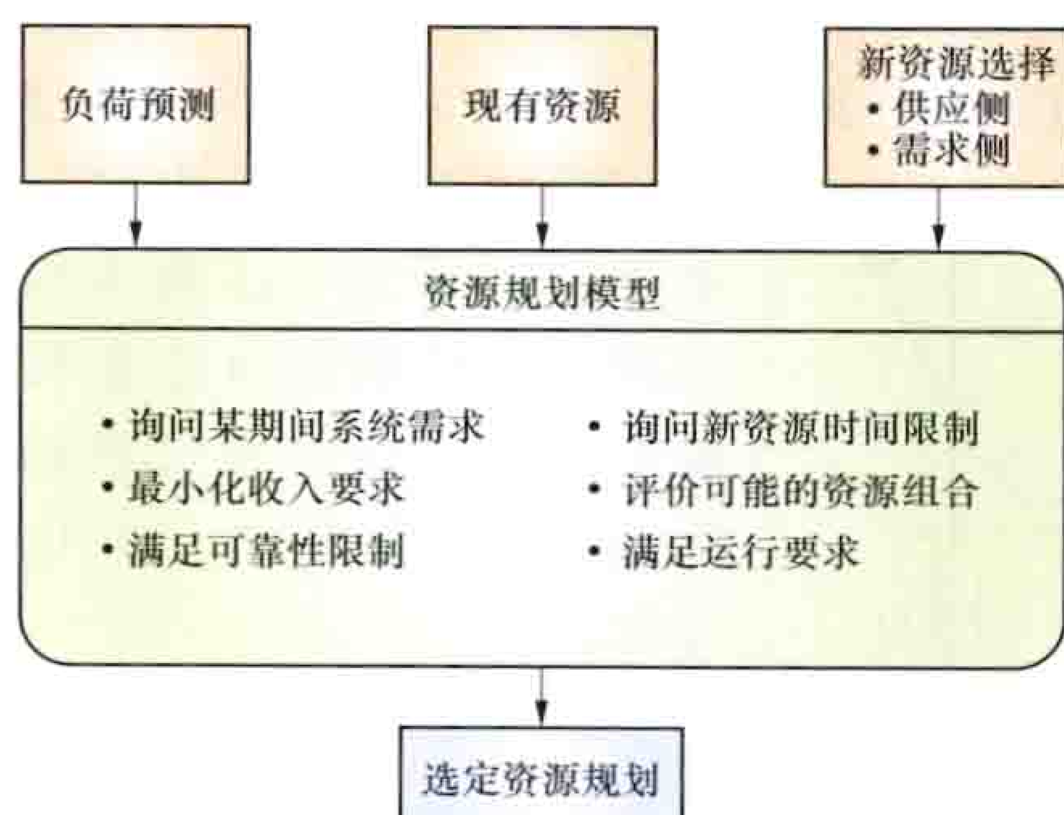


图 4　联立法流程图

参考书目

国家发展和改革委员会，国家电网公司．电力需求侧管理工作指南．北京：中国电力出版社，2007.

zuhe kaiguan

组合开关 (component switch)　一种旋转操作的开关电器（见低压电器）。组合开关由内装动、静触头的一层层绝缘盒组合叠装而成，实质上也是一种刀开关。它一般用作非频繁操作的电源开关、控制与测量电路的开关和小容量异步电动机的开关等。

组合开关由手柄、转轴、旋转定位机构、触头及绝缘盒等组成。手柄转动定位有 90°和 120°两个挡位。组合开关有多种组合方式以满足各种用途与接法的需要。组合开关有单极、双极、三极、四极几种。图 1 示出了几种常用组合开关的原理接线图，各图上面有手柄位置示意，图中 x 表示进线端，c 表示出线端。绝缘盒内动、静触头的布置示意图如图 2 所示，转轴可带动片式动触头在盒内转动，动触头与静触头接触时电路被接通。当组合开关的手柄处于水平位置时，开关分断，电路被分断；手柄处于其他位置时电路被接通。图 1（a）示出的是双极双电源进线转换用组合开关原理接线图。当手柄由水平位置顺时针旋转 120°时，片式动触头也相应地转动 120°，这时进线端 1x1、1x2 与出线端 c1、c2 接通；若手柄由零位反时针旋转 120°，则使进线端 2x1、2x2 与出线端 c1、c2 接通。图 1（b）示出的是测量三相交流电压用组合开关原理接线图。它用一只电压表来测量三相电压，手柄处于零位时电压表不接通；顺转 90°，电压表的接线端 V1 与 V2 接入 x1 与 x2 端；再旋转 90°，电压表接入 x1 与 x3 端；再继续旋转 90°，电压表接入 x2 与 x3 端。

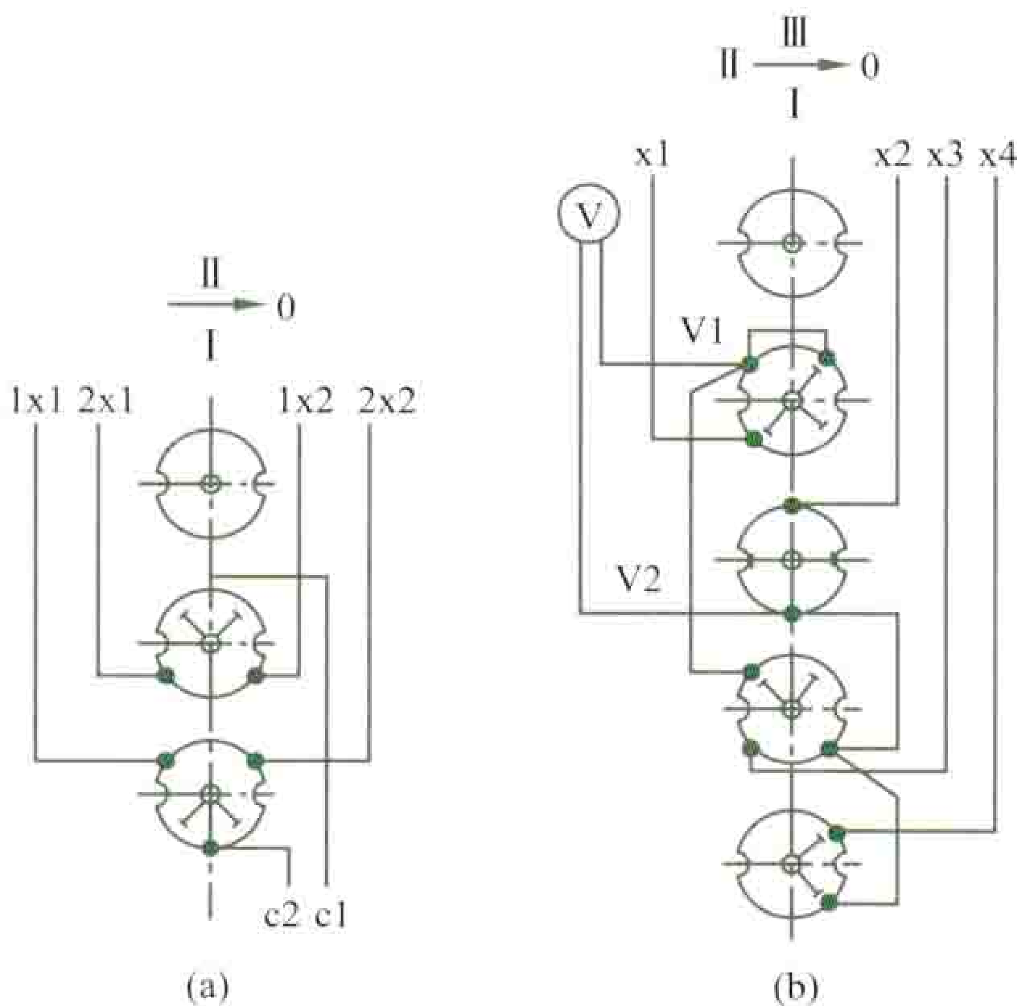


图 1　常用组合开关原理接线图
（a）双极双电源进线转换用组合开关；（b）测量三相交流电压用组合开关

组合开关与刀开关比较，安装面积小，又由于组合开关灭弧性能有所改善，其通断能力相对高一些，但远低于低压断路器。因此，它不能用来分断故障电流。如用于控制电动机的可逆运转，必须在电动机完全停止转动后，才允许反方向接通电动机的电源。

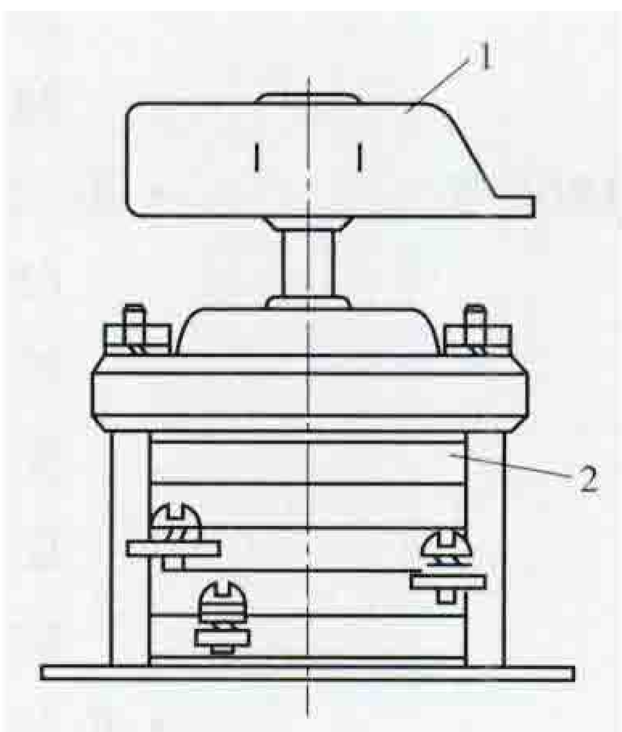


图 2　绝缘盒内动、静触头布置示意图
1—手柄；2—绝缘盒

大　事　年　表

1799 年
- 意大利物理学家 A. 伏打（A. Volta，1745—1827）创造了第一个实用电池，当时被称为伏打电堆（Volta pile）。1802 年，俄国人 V. V. 彼得罗夫用伏打电堆研究放电现象，发现了电弧，并指出电弧的发光和产生的高温，在照明及加热中将得到应用。

1800 年
- 英国天文学家 F. W. 赫歇耳（F. W. Herschel，1738—1822）发现红外辐射。1835 年，法国科学家 A. M. 安培（A. M. Ampere，1775—1836）证实红外辐射与可视光是同一种类型的光波——电磁波。
- 英国人 W. 尼科尔森（W. Nicholson，1753—1815）通过电解水制得氧气和氢气。

1807 年
- 英国人 H. 戴维（H. Davy）用电解法从钾、钠的氢氧化物中分离出金属钾与钠。同年，他还制成世界第一台弧光灯。

1820 年
- 英国在伦敦码头铺设了第一条用于货物运输的独轨铁路。

1821 年
- 英国物理学家 M. 法拉第（M. Faraday，1791—1867）演示了通电流的导线环绕磁铁旋转的现象，这种电磁旋转装置可以认为是直流电动机的雏形。

1821～1825 年
- 法国科学家 A. M. 安培（A. M. Ampere，1775—1836）推导了电动力公式，得出安培环路定律，奠定了电动力学的基础。

1823～1825 年
- 英国人 P. 巴洛（P. Barlow）、W. 斯特金（W. Sturgeon），美国人 J. 亨利（J. Henry）分别制作了电磁铁。

1825 年
- 丹麦人 H. C. 奥斯特（H. C. Oersted）用钾汞齐加热还原无水氯化铝获得金属铝。
- 世界上第一列火车在英国运行。

1831 年
- 英国物理学家 M. 法拉第（M. Faraday，1791—1867）提出了法拉第电磁感应定律。这一定律将磁的现象与电的现象联系起来，奠定了机电能量转换的理论基础。同年，他利用电磁感应发明了世界上第一台真正意义上的电机——法拉第圆盘发电机。
- 美国人 J. 亨利（J. Henry）制作了一个简单的振荡电动机。

1832 年
- 英国人 W. 斯特金（W. Sturgeon）发明了换向器，并制作了世界上第一台能产生连续运动的旋转电动机。

1833 年
- 英国物理学家 M. 法拉第（M. Faraday，1791—1867）制定了一套电化学新名词，提出"电极""离子""电解""电解质"等概念，以及关于电化当量的法拉第电解定律。法拉第电解定律是电化学、电解、电镀等应用技术的重要依据。

1834 年
- 美国人 T. 达文波特（T. Davenport，1802—1851）制成一台直流电动机。

1836 年
- 德国人 M. H. 雅科比（M. H. Jacobi，1801—1874）发明了电镀技术。1837 年入俄籍。1839 年，他发明了电铸技术。
- 英国人 J. B. 埃尔金顿（J. B. Elkington）利用丹尼尔电池为电源发明了电镀银的技术。

1838 年
- 俄籍德裔科学家 Б. С. 雅科比（Б. С. Якоби，1801—1874）设计并制造了一台可供实用的直流电动机，使用化学电池给直流电动机供电，驱动一条小船的推进器，初步显示了电动机的实用性，电力拖动技术开始形成。
- 俄国物理学家 Э. Х. 楞次（Э. Х. Ленц，1804—1865）最早提出一台电动机既可作为发电机又可作为电动机运转的可逆性原理。

1840 年
- 英国的埃尔金顿（Elkington）兄弟获得氰化镀银专利并创办电镀工厂进行镀银茶具、发饰、餐具、灯饰等的生产，电镀工业始于此。

1844 年
- 美国人 J. 戈里设计制造的压缩空气制冷机用于商业制冷和空气调节。
- 法国人 J. B. L. 傅科制成用木炭作电极的弧光灯。

1845 年
- 英国人 C. 惠斯通（C. Wheatstone）用电磁铁代替永久磁铁，这是增强电动机输出功率的一个重要措施。

1858 年
- 美国人 H. E. 史密斯（H. E. Smith）发明世界上第一台机械式洗衣机。

1859 年
- 法国人 R. L. G. 普朗特（G. Planté，1834—1889）制成一种铅酸蓄电池。1860 年，

他发明了第一个供实用的铅酸蓄电池。

- 意大利人 A. 帕奇诺蒂（A. Pacinoti，1841—1912）发明环形电枢，并制成电动机，构成了现代电动机的原型。

1860 年
- 英国人 J. W. 斯旺（J. W. Swan）在抽出空气的玻璃泡内装上炭化纸丝，发明了原始的电灯。

1863 年
- 1 月10 日，英国伦敦建成世界上第一条地铁。

1865 年
- 英国人 J. B. 埃尔金顿（J. B. Elkington）公布了铜电解精炼的专利。

1866 年
- 德国人西门子制造出世界上第一台发电机。

1868 年
- 法国人 G. 勒克朗谢（G. Leclanché，1839—1882）发明锌-锰干电池，当时为湿电池，1886 年始由美国人 C. 加斯纳（C. Gassner）将其改进为干电池。

1869 年
- 美国人 I. W. 麦加夫南（I. W. McGaffney）发明了使用人工操作的带有吸附装置的扫除机。

1873 年
- 比利时发明家 Z. T. 格拉姆（Z. T. Gramme，1826—1901）和法国人 E. 方丹（E. Fontaine）制作了两台电机，在维也纳国际博览会上用蒸汽机驱动其中一台大的电机发电，向 1km 外的另一台电机供电，成功地驱动了水泵。
- 英国人 R. 戴维森制成第一辆有实用价值的电动汽车。

1879 年
- 美国发明家 T. A. 爱迪生（T. A. Edison，1847—1931）发明碳丝白炽灯，构成了现代白炽灯的雏形。
- 德国发明家 E. W. 西门子（E. W. Siemens，1816—1892）和 J. G. 哈尔斯克（J. G. Halske，1814—1890）在英国获得第一个自整角机专利。
- 德国人 K. W. 西门子（K. W. Siemens，1823—1883）制造了一台实验用直流炼钢电弧炉。
- 德国柏林工业博览会上展出世界上第一条实用化电气化铁路，由电力机车牵引 3 辆客车，采用第三轨供电，供电电压为直流 150V。

1880 年
- 美国发明家 T. A. 爱迪生（T. A. Edison，1847—1931）利用电解原理制成了世界上最早的直流电能表（即安时计）。

1881 年
- 法国人 L. 利特伦基（L. Litrange）公布了电解提取锌的专利并开始使之工业化。
- 美籍发明家 N. 特斯拉（N. Tesla，1856—1943）发现旋转磁场原理，并于 1883 年制成世界第一台两相感应电动机。
- 在法国巴黎国际电工展览会上展出了第一条由架空接触线供电的直流电气化铁路。
- 法国巴黎出现了世界上第一辆以可充电池为动力的电动汽车，电池采用铅酸蓄电池。

1882 年
- 美国人 H. W. 西利（H. W. Seely）获得第一个电熨斗专利。
- 德国西门子公司将直流串励电动机正式用于电力机车。
- 7 月 26 日，英国商人 R. W. 立德尔（R. W. Little）在上海大马路 31 号 A（今南京东路 190 号）创办的中国第一座发电厂正式发电，点亮了沿外滩到虹口招商局码头串接的 15 盏弧光灯。中国电力工业由此起步。
- 美国人 E. 汤姆逊（E. Thomson）制成电磁式电能表。

1883 年
- 5 月，上海电气公司在百老汇立杆放线，办理用户报装用电业务。

1884 年
- 德国 P. G. 尼普科夫（P. G. Nipkow，1860—1940）发明螺盘旋转扫描器，实现最原始的电视传输和显示。

1885 年
- 意大利 G. 费拉里斯（G. Ferraris）提出交流电动机的旋转磁场理论，这是交流电动机理论的重要发展。
- 俄国人 H. H. 别纳尔多斯（H. H. Бенардос）发现了碳极电弧。

1886 年
- 美国人 C. M. 霍耳（C. M. Hall，1863—1914）和法国人 P. L. T. 埃鲁（P. L. T. Heroult，1863—1914）同时发明工业制铝法，通称霍耳-埃鲁法，该方法成为百年来唯一的工业炼铝方法。
- 美国人 H. Y. 卡斯特纳（H. Y. Castner）电解光卤石制取镁，开创了熔盐电解工业。
- 美国阿拉巴马州的蒙哥马利市开始出现有轨电车。

1887 年
- 瑞典物理化学家 S. A. 阿累尼乌斯（S. A. Arrhenius，1859—1927）创立了电离理论。
- 美国人 E. 汤姆逊（E. Thomson）发明了用于薄板焊接的电阻焊。

1888 年
- 俄国人 M. O. 多利沃-多布罗沃利斯基（M. O. Доливо-Добровольский，1861—1918）提出三相制。1889 年，他制成一台实用的三相笼型感应电动机。

1889 年
- 德国物理学家能斯特（Nernst，1864—1941）创立了原电池理论，使电化学热力学逐步完善。
- 匈牙利岗兹公司制成总质量为 36.5kg 的

世界上第一块感应式电能表。
- 美国工程师 J. J. 伍德（J. J. Wood）在福特公司制成世界第一台电风扇，并获得固定式和旋转式电扇专利。

1890 年
- 美国西屋电气公司利用 N. 特斯拉（N. Tesla，1856—1943）的专利制成第一台能自起动的同步电动机。
- 英国在伦敦地下铁道首先使用电力机车。
- 美籍发明家 N. 特斯拉（N. Tesla，1856—1943）提出了单相电动机的分相起动法。1891 年，他发明特斯拉线圈，被广泛应用于无线电、电动机以及其他电子设备中。
- 美国人 E. 汤姆逊（E. Thomson）提出了罩极电动机。

1889～1890 年
- 法国人 P. L. T. 埃鲁（P. L. T. Heroult，1863—1914）制成了第一台可供实用的直流电弧炉。

1891 年
- 电动发电机组——华德利翁（Ward-Leonard）直流调速系统诞生。
- 世界上第一条三相交流远距离输电线路由劳芬至法兰克福投入运行。

1895 年
- 美国人 F. J. 斯普拉克设计出集中控制、分辆传动的电力牵引系统。
- 美国首先在铁路干线使用电力机车。

1898 年
- 1 月，清政府上海市马路工程善后局在十六铺太平码头建成南市电厂，为 30 盏路灯照明供电。

1899 年
- J. 苏门（J. Thurman）发明世界上第一台电动真空吸尘器。
- 瑞典人 W. 琼格纳（W. Jungner）发明镉-镍蓄电池。
- 加拿大人 W. 布朗（W. Brown）用两组电解槽分别析出铜、镍。

1900 年
- 上海斐伦路电厂的输电线路全长已达 18km，输电电压最高 2500V，全市共有 12 个配电站，这是中国最早的输配电网。

1901 年
- 美国发明家 T. A. 爱迪生（T. A. Edison，1847—1931）发明了铁-镍蓄电池。1904 年，T. A. 爱迪生发明了碱性蓄电池。
- 德国伍珀塔尔市建造了一条悬挂式独轨铁路，采用 600V 直流电力牵引。该线从 1901 年通车运行至今，是世界上营业线中最古老的独轨铁路。

1902 年
- 美国人 W. H. 卡里尔设计创制空气调节装置。

1903 年
- 英国人 W. V. 佰顿（W. V. Bolton）首次使用自耗电极在真空充氩气氛下进行了钽的熔炼。

1905 年
- M. V. 皮拉尼（M. V. Pirani）提出电子束熔炼的概念。
- 瑞士人塔菲尔（Tafel）提出描述电流密度和氢过电位之间的半对数经验公式。

1906 年
- 中国的有轨电车始建于天津。
- 美国人 W. C. 艾森（W. C. Aisen）发明了电阻加热式真空熔炼炉。

1907 年
- 美国人 J. M. 斯潘格勒（J. M. Spangler）发明带有风机、旋转刷和集尘袋的移动式真空吸尘器，这是现代吸尘器的雏形。

1908 年
- 英国人威廉·威利特（William Willett）在英国议会上提出夏时制。

1910 年
- 世界上第一台压缩式制冷的家用电冰箱在美国问世。
- 美国人 A. J. 费希尔（A. J. Fisher）发明世界上第一台电动洗衣机。

1913 年
- 美国通用电气公司首次将自整角机用于巴拿马运河。
- 国际照明委员会［Commission Internationale de l'Éclairage（法），CIE］成立。

1914 年
- 美国人 G. 休斯制成第一台电灶。

1915 年
- 上海制成中国第一台电风扇。

1916 年
- 3 月，德国率先实行夏时制。

1917 年
- 美籍科学家 A. 爱因斯坦（A. Einstein，1879—1955）提出受激辐射的假设。
- 美国人 E. F. 诺思拉普（E. F. Northrup）研制出电火花高频振荡电源装置，并依此开发了第一台高频感应炉，用于钢的熔炼。

1918 年
- 美国人 J. R. 怀特（J. R. Wyatt）开发了"暗沟式"有心感应炉。

1919 年
- 超外差收音机问世。
- 英国建成第一个定时播发语言和音乐的无线电广播电台。

1922 年
- 美国制成第一台搅拌式洗衣机。

1923 年
- 上海生产出中国第一批白炽灯泡。
- 中国江苏省戚墅堰的震华发电厂通过 6kV 电力线路，为附近农村的农田排灌和碾米加工供电，开始了中国的排灌用电。

1923～1924 年
- 美国人 V. K. 兹沃雷金（V. K. Zworykin）相继发明了摄像管和显像管。1931 年，他组装成世界上第一个全电子电视系统。

1924 年
- 英国人约翰·洛奇·贝尔德（John Logie Baird）发明第一台电视机。

1925 年
- 英国人 H. H. 莱克（H. H. Lake）获得木炭气体发生装置专利。
- 美国在滚筒式电阻炉中进行气体渗碳。
- 瑞典开发了家用吸收式电冰箱。

1926 年
- 中国上海开始有无轨电车。
- 美国人伦逊在实验室完成了真空断路器的雏形，20 世纪 50 年代中期真空断路

器产品在美国问世。

1927 年
- 美国创制成世界上第一台由电动机直接驱动的洗碗机。
- 美国研制成功全封闭压缩式制冷装置。
- 美国在铁路上开始采用调度集中控制装置。

1929 年
- 中国上海大华科学仪器股份有限公司制造出第一只 3in 直流磁电式电能表，精度 2.0 级。

1930 年
- 电视图像和声音在世界上首次实现同时播发。
- 美国发明了埋弧焊。
- 美国研制成功房间空气调节器。

1931 年
- 制冷剂 CFC12 研制成功，并在工业上使用。
- 美国提出窗式空调器专利。

1932 年
- 美国出现第一台前装式滚筒洗衣机。

1933 年
- 美国总统富兰克林·罗斯福提出联邦政府扶持农村实施电气化的主张。1935 年，美国总统签署政府令，规定在农村普遍发展用户自有的农村电力合作社，并由政府向合作社发放长期低息贷款。1936 年，美国总统签署《农村电气化法》。1942 年，美国成立全国农村电力合作社协会。1957 年，美国农村基本实现电气化。

1936 年
- 日本制成落地式空冷房间空气调节器。

1937 年
- 美国制成自动滚筒式洗衣机。1939 年，全自动洗衣机研制成功。

1938 年
- 美国工程师因曼（Inman）在纽约博览会上展出了第一只热阴极荧光放电灯。

1939 年
- 美国人 R. K. 霍普金斯（R. K. Hopkins）首先提出电渣重熔精炼方法。

1940 年
- 美国研制成功第一台电热烘干的全自动洗碗机。

1941 年
- 美国人 S. 鲁宾（S. Ruben）研制出锌-汞干电池，又称汞电池。

1947 年
- 美国人 P. L. 斯潘塞（P. L. Spencer）获得第一个微波炉专利。

1949 年
- 美国开发了世界上第一台工业用真空电阻炉。

1950 年
- 上海生产出新中国第一批荧光灯。
- 中国上海钰华电器厂仿制成功英国单相电能表，总产量 1000 台左右。

1951 年
- 苏联巴顿电焊研究所发明了电渣焊。
- 美国西屋电气公司首先制造出 SF_6 断路器。

1952 年
- 中国推行用电监察制度。1963 年，中国颁布第一个《用电监察条例》。
- 沈阳医疗器械厂制成中国第一台装有开启式压缩机的电冰箱。
- 上海和成电器厂生产出中国第一只 2.0 级机械式单、三相电能表。

1953 年
- 燃料工业部制定《供用电暂行规则》，经政务院财政经济委员会于 1953 年 8 月 29 日批准生效。1963 年 9 月 23 日，国家经济委员会批准《全国供用电规则》。1966 年，水利电力部对《全国供用电规则》进行修改，取名为《全国供用电规则（试行本）》。1972 年 7 月 24 日，国家计划革命委员会批准《供用电规则（试行本）》。1983 年 8 月 25 日，国家经济委员会批准《全国供用电规则》。1996 年 10 月 8 日，电力工业部发布《供电营业规则》。
- 苏联人 B. 柳巴夫斯基等发明了二氧化碳气体保护焊。

1955 年
- 日本研制出波轮式洗衣机。
- 中国首次设计和制造自动闭塞信号。

1956 年
- 中国第一本照度标准《工业企业人工照明暂行标准》颁布。
- 天津医疗器械厂试制出中国第一台全封闭压缩式电冰箱。
- 宝成铁路建成通车，这是沟通中国西北和西南的第一条铁路干线，铁路全长 668.2km。

1957 年
- 美国人 R. 盖奇（R. Gage）发明等离子体弧焊。
- 用于特殊钢熔炼的真空电弧炉在美国投入工业运行。
- 大功率可控电力电子器件——晶闸管问世。
- 沈阳轻工机械厂试制出中国第一台家用洗衣机。

1958 年
- 12 月，中国制成第一台交流引燃管电力机车，命名为韶山 1 型（SS1）电力机车。
- 瑞典人 N. V. 海比内特（N. V. Hybinett）发明隔膜电解法，并沿用至今。
- 天津试制成功中国第一台电子管式黑白电视机。

1960 年
- 上海研制成功中国第一台吸尘器并开始批量生产。
- 日本开发了热泵型空调器。
- 美国人 T. H. 梅曼（T. H. Maiman）制成第一台红宝石激光器。
- 美国人 A. 贾万（A. Javan）制成波长为 1.15μm 的氦氖激光器。
- 中国第一座电渣炉在上海重型机器厂建成。

1961 年
- 中国政府在水利电力部设置农村电气化司，管理农村电气化发展建设工作，农村电气化建设纳入国家计划。
- 中国研制出真空感应熔炼炉。

- 中国开通第一条电气化铁路——宝成铁路宝鸡—凤州段。宝成铁路是沟通中国西北和西南的第一条铁路干线，铁路全长668.2km，于1956年建成通车。1975年，宝成铁路全线实现电气化。

1963年

- 比利时学者M. 普尔贝（M. Pourbaix）出版了按元素周期表分类汇编的金属-水系的电位-pH图，这对冶金、化工等学科都有非常重要的意义。
- 中国按用电容量对10kV及以下公用及专用配电网的建设向用户收取供电贴费。1982年，供电贴费的收取范围扩大到110kV以下的用户。1993年，供电贴费的收取范围扩大到110kV的用户。2000年6月，供电贴费收费减半。2002年1月，停止收取供电贴费。2003年12月，对申请新装及增加用电容量的两路及以上多回路供电（含备用电源、保安电源）用电户，收取高可靠性供电费用。

1964年

- 日本建成世界上第一条时速超过200km的高速铁路——东京至大阪的东海道新干线。干线全长515.4km，运营速度高达210km/h。
- 上海试制成功中国第一台涡卷式双桶洗衣机。
- 德国A. 舍龙（A. Schonung）等将通信系统的调制技术应用于交流电动机调速中，采用了脉冲宽度调制实现变频调速。

1965年

- 上海试制成功中国第一台窗式房间空气调节器。
- 世界上第一个燃料电池在宇航中获得应用。

1966年

- 中国制成30t炉盖旋开式顶装料电弧炉。
- 中国第一台铁坩埚无心工频熔铝炉研制成功。

1968年

- 中国研制出15m立式真空淬火炉，60kW电子束炉。

1969年

- 中国建成第一条地下铁道——北京地铁1号线。

1970年

- 中国开始实行计划用电。1978年实行电力供应。1998年9月，停止执行购买用电权、控制非生产用电、超计划（指标）用电加价政策，放开了用电限制。
- 1970年前后，中国制成无罐推送式气体渗碳、淬火、清洗、回火汽车零件热处理生产线。

1971年

- 天津无线电厂试制成功中国第一台彩色电视机。
- 德国人F. 布拉斯克（F. Blaschke）提出了矢量控制，使交流电动机的调速性能有可能与直流电动机的调速性能相媲美。
- 美国360t超高功率电弧炉投入运行，这是世界上容量最大的炼钢电弧炉。

1972年

- 美国西屋电气公司将世界上第一台电磁灶投放市场。

1973年

- 中国开始试播彩色电视。

1974年

- 中国有线电视诞生。
- 冷却气体压力为170kPa的首台高压气体真空淬火炉问世。
- 英特尔公司生产出8080型微型集成电路芯片，E. 罗伯茨（E. Roberts）随之发布了自己制作的装配有8080处理器的计算机——Altair（牛郎星），这也是世界上第一台装配有微处理器的计算机。

1975年

- 9月，国际照明委员会在伦敦举行的CIE第18届大会上发表了照明节能的声明。
- 中国研制出第一台铸铁熔炼用20t大型工频无心感应炉。

1976年

- 中国自主研发并生产电子式单相标准电能表。20世纪70年代，中国开始使用电子式标准电能表。1991年，中国研制出第一只安装式三相电子式电能表。1995年，中国批量生产第一批民用电子式电能表。
- 中国制成75t普通功率炼钢电弧炉。

1979年

- 世界上第一个“有线电视”在伦敦开通。它能将计算机里的信息通过普通电话线传送出去并显示在用户电视机屏幕上。

1981年

- 日本东芝公司实现了空调器的变频控制，提高了舒适性，节约了能源。
- 法国巴黎—里昂线开通运营，该线路最高运营速度为270km/h，这是法国第一条高速铁路。
- 12月，《中华人民共和国经济合同法》颁布，将供用电合同列为十类基本合同之一。1999年3月15日，九届全国人大二次会议审议通过《中华人民共和国合同法》，将供用电合同列为十五类基本合同之一，并于1999年10月1日起施行。

1983年

- 8月18日，美国德克萨斯州遭受风速达185km/h飓风袭击，造成休斯敦电灯及电力公司供电的75%用户停电。这是第二次世界大战以来，电力系统所遭受到的最严重的大停电。
- 12月，中国政府批准在小水电发达地区

试点建设100个初级农村电气化县的计划。1984年1月5日，国务院公布全国100个农村电气化试点县名单。1994年，中国政府提出到20世纪末建设1000个电气化县的计划。

1984年
- 上海梳灯厂试制成功中国第一台外排式吸油烟机。
- 美国联合科技公司将建筑设备信息化、整合化概念应用到建筑物中，成为首栋智能型建筑。

1985年
- 德国人M. 迪潘布鲁克（M. Depenbrock）首次提出交流电动机的直接转矩控制，实现转矩的迅速响应。

1986年
- 5月4日，中国开始在全国实行夏时制。1990年，中国停止实行夏时制。

1987年
- 3月，中国国务院颁布《关于进一步加强节约用电的若干规定》（国发〔1987〕25号），在全国范围内开展以合理使用能源、节约用电、提高终端电能效率为目标的需求侧管理活动。
- 6月1日，中国照明学会（China Illuminating Engineering Society，CIES）成立。中国照明学会是中国科学技术协会所属全国性一级学会。学会于成立当年，即以中国国家照明委员会（China National Commission on Illumination）的名义加入国际照明委员会（CIE），是在国际照明委员会中代表中国的唯一组织。
- 中国研制出微机控制的大型井式气体渗碳炉。

1990年
- 中国研制出碳-碳化学气相沉积炉。

1991年
- 1月，美国环保局（EPA）首先提出"绿色照明"和推进"绿色照明计划"的概念。
- 中国研制成功大型真空钎焊炉。
- 中国研制成功万瓦级CO_2气体激光器。
- 6月14日，中国正式签署《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》，简称《蒙特利尔议定书》。
- 中国研制出第一只安装式三相电子式电能表。

1993年
- 6月，国家计委能源研究所在深圳电网开展了采用综合资源规划方法进行需求侧管理的试点研究。
- 6月，国务院颁布《电网调度管理条例》，自1993年11月1日起施行。
- 中国城乡建设部与水利电力部联合发布了《城市电力网规划设计导则》（能源电〔1993〕228号），有效地指挥了中国大规模配电系统的改造工作。
- 中国开发了高强度红外辐射加热技术。

1994年
- 12月，中国在河北省三河县实现全县35kV农村变电站无人值班。

1995年
- 12月28日，《中华人民共和国电力法》以中华人民共和国主席令第60号颁布，自1996年4月1日起实行，是中国关于电力事业的第一部基本法规。
- 荷兰飞利浦公司开发出发光效率高于90lm/W、显色性$R_a>80$的16mm（T5）管径的直管三基色荧光灯。

1996年
- 4月17日，中国国务院颁布《电力供应与使用条例》，自1996年9月1日施行。
- 5月，中国电力工业部发布《供用电监督管理办法》，该办法自1996年9月1日起施行。
- 5月，中国电力工业部发布《供电营业区划分及管理办法》，该办法自1996年9月1日起施行。
- 6月，中国第一台交流-直流-交流AC4000型电力机车研制成功，表明中国电力机车技术已进入交流传动技术领域（第四代电力机车）。
- 8月，中国电力工业部颁布《用电检查管理办法》。
- 10月8日，中国电力工业部发布《供电营业规则》，自发布之日起施行。
- 10月，中国政府启动实施中国绿色照明工程，并与联合国开发计划署、全球环境基金开展了三期淘汰白炽灯推广节能灯的绿色照明国际合作项目。
- 美国网景公司提出网络家电的概念。

1997年
- 在日本京都召开的《联合国气候变化框架公约》第三次缔约方大会上通过了《联合国气候变化框架公约京都议定书》（简称《京都议定书》），旨在限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖。中国于1998年5月签署并于2002年8月核准了《京都议定书》。《京都议定书》于2005年2月生效，截至2009年12月，已有184个缔约方签署。
- 11月1日，中国第八届全国人民代表大会常务委员会第二十八次会议通过《中华人民共和国节约能源法》，1998年1月1日起实施。2007年10月28日，中国第十届全国人民代表大会常务委员会第三十次会议修订通过《中华人民共和国节约能源法》，2008年4月1日起施行。

1998年
- 8月，中国建成第一条行车速度达200km/h的准高速电气化铁路——广（州）深（圳）铁路。广深铁路西起广州东站，东至深圳罗湖桥站，全

长 139.461km。

- 9 月，中国停止执行购买用电权、控制非生产用电、超计划（指标）用电加价政策，放开了用电限制。
- 10 月，中国国务院办公厅转发了国家计划委员会关于改造农村电网、改革农电管理体制、实现同网同价（简称“两改一同价”）的通知，要求统一城乡用电价格，实现同网同价。2004 年，全国实现城乡居民生活用电同价。
- 中国启动一期农网改造工程。2002 年，中国启动二期农网改造工程。2004 年，中国一、二期农网建设和改造工程完成，解决了农民基本生产生活用电问题；同时启动了中西部农网完善工程。
- 中国生产出数字电视机。

1999 年

- 在德国科隆博览会上伊莱克斯公司首次展出可以上网的电冰箱。
- 中国数字电视开播，标志着中国模拟电视向数字电视的转换。

2001 年

- 美国提出微电网的概念。

2002 年

- 12 月31 日，世界上第一条投入商业化运营的磁浮列车示范线——上海龙阳路—浦东机场磁浮铁路启用。
- 中国大陆设定“95598”为全国统一的供电客服号码。

2003 年

- 北京时间 8 月 15 日，美国中西部、东北部及加拿大安大略省发生了大面积停电事件。事件开始于美国东部时间 14 日 16 时左右，4 日后美国部分地区的电力供应仍未完全恢复，安大略省部分地区的停电持续了一个多星期。停电事件影响到约 5000 万人口，造成美国俄亥俄等 7 个州及加拿大安大略等地区约 6180 万 kW 的负荷损失，停电范围超过 9300mile^2（1mile^2 = 2.589 988km^2）。停电造成的损失估计为 40 亿～100 亿美元。

2004 年

- 11 月，中国国家发展和改革委员会（简称发改委）发布《节能中长期专项规划》（发改环资〔2004〕2505 号）。指出应推行以市场机制为基础的节能新机制，包括建立节能信息发布制度；推行综合资源规划和电力需求侧管理；大力推动节能产品认证和能效标识管理制度的实施；推行合同能源管理。

2005 年

- 2 月2 日，中国国务院第 80 次常务会议通过《电力监管条例》，该条例自 2005 年 5 月 1 日起施行。
- 3 月28 日，中国国家发改委颁布《销售电价管理暂行办法》。
- 能效电厂的概念引入中国。
- 中国上海重型机器厂有限公司投建 450t 电渣炉（450t 电渣锭相当于 600t 普通钢锭），是当时世界上最大的电渣炉。
- 3 月1 日，中国正式实施能效标识制度。
- 中国开发生产了 100t 电弧炉。
- 中国颁布《中华人民共和国可再生能源法》，自 2006 年 1 月 1 日起施行。

2006 年

- 7 月1 日，重庆轻轨较新线全线开通，是中国第一条采用高架跨座式独轨铁路。
- 中国研制出 260t 钢包精炼炉。
- 首批时速 120km/h、单机牵引 5000t“和谐”型国产化大功率交流传动电力机车交付使用，标志着中国铁路机车行业成功实现由直流传动向交流传动的转化。

2007 年

- 4 月，中国进行第六次铁路大面积提速，和谐号电动车组在既有线上实现了最高时速 250km/h 的高速运行，在客运专线上实现了最高时速 300km/h 的高速运行。

2008 年

- 5 月12 日 14 时 28 分，中国四川省西北部阿坝藏族自治州汶川县（北纬 31°、东经 103.4°）发生里氏 8.0 级地震，震源深度为 10～20km。这是中国自 1949 年以来破坏性最强、波及范围最大、救灾难度最大的一次地震。同时，区域内的电力设施也遭到严重破坏，引起大面积停电。自 2009 年起，每年 5 月 12 日为中国防灾减灾日。
- 中国建成第一条最高时速达 350km 的客运专线——京津城际铁路。
- 中国开发了 250t 大容量高阻抗电弧炉。
- 中国启动农网完善工程和无电地区电力建设工程。

2009 年

- 11 月，中国国家电力监管委员会颁布《供电监管办法》，自 2010 年 1 月 1 日起施行。

2010 年

- 11 月，中国国家发改委、工业和信息化部、财政部、国资委、电监会、能源局联合发布了《电力需求侧管理办法》（发改运行〔2010〕2643 号），提出了电力需求侧管理的管理措施和激励措施。
- 中国全面启动实施新一轮农村电网改造升级工程。这次农网改造升级要逐步使农村电网和城市电网具有同样的供电可靠性，保障农业生产用电。

2011 年

- 中国建成运营速度达 300km/h 的京沪高速电气化铁路，线路总长 1318km。
- 中国启动“十二五”水电新农村电气化建设。
- 3 月11 日，日本当地时间 14 时 46 分，日本东北部海域发生里氏 9.0 级地震

并引发海啸，震中位于宫城县以东太平洋海域（北纬 38.1°、东经 142.6°）；震源深度 20km，属浅源地震。地震导致日本东北地区和关东地区大面积停电。

- 5 月1 日，由中国国家发改委制定的《有序用电管理办法》开始实施。
- 11 月 29 日，中国国家发改委印发《关于居民生活用电实行阶梯电价的指导意见》。
- 11 月，中国国家发改委、商务部、海关总署、工商总局、质检总局共同发布公告，从 2012 年 10 月 1 日起逐步禁止进口（含从海关特殊监管区域和保税监管场所进口）和销售普通照明白炽灯；最终至 2016 年 10 月 1 日起，禁止进口和销售 15W 及以上普通照明白炽灯。
- 12 月，青海玛多县通电，中国结束无电县历史。

2012 年

- 7 月，中国全面试行居民阶梯电价政策。
- 7 月，中国财政部和国家发改委出台《电力需求侧管理城市综合试点工作中央财政奖励资金管理暂行办法》（财建〔2012〕367 号），确定北京、苏州、唐山和佛山为首批电力需求侧管理试点城市。
- 中国研制出 300t LF 型钢包精炼炉、炉盖旋转式双加热工位的 210t 和 230t LF 型钢包精炼炉。

条目标题汉字笔画索引

说　明

一、本索引供读者按条目标题的汉字笔画查检条目。

二、条目标题按第一字的笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的字按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括丁乚く等）的顺序排列。第一字相同的，依次按后面各字的笔画数和起笔笔形顺序排列。

三、以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的条目标题依次排在汉字开头的条目标题的后面。

四、参见条（虚条）的页码采取虚实条兼注的方式，即参见条页码在括号外，被参见条页码在括号内。

［丿］

六画

［一］

七画

［一］

八画

［一］

九画

十画

十一画

［一］

十二画

［一］

条目标题外文索引
(INDEX OF ARTICLES)

A

B

C

内 容 索 引

说 明

一、本索引是全卷条目和条目内容（含插图）的主题分析索引。索引主题按汉语拼音字母的顺序并辅以汉字笔画、起笔笔形顺序排列。同音时，按汉字笔画由少到多的顺序排列，笔画数相同的字按起笔笔形一（横）、丨（竖）、丿（撇）、丶（点）、乛（折，包括亅乚く等）的顺序排列。第一字相同的，按第二字，余类推。以罗马数字、阿拉伯数字、拉丁字母、斯拉夫字母和希腊字母开头的主题，依次排在汉字索引主题的后面。

二、设有条目的主题用黑体字，未设条目的主题用仿宋体字。

三、索引主题之后的阿拉伯数字是主题内容所在的页码，数字之后的小写拉丁字母表示索引内容所在的版面区域。本书正文的版面区域划分如右图。

a	d
b	e
c	f

C

D

E

F

G

H

J

K

Q

R

S

X

Y

Z

插 图 索 引

配电与用电卷（第三版）修订人员名单

（按姓氏笔画排列）

于坤山　于　淼　马青年　马晓茜　王书晓　王立天　王存诚　王　利
王金丽　王　峥　王贺武　王　晋　王蓓蓓　王赛一　牛　峰　牛　靖
仉志华　方耀明　石文鹏　田杭亮　田树荣　田　敏　史俊强　朱星衵
朱　琳　任　利　刘　东　刘永清　刘运兴　刘树德　刘福义　齐永超
关　宏　汤　军　许坤田　许　敏　许　强　孙旭东　孙齐锋　孙　凯
孙德堃　苏文群　苏秀苹　苏鹏程　杜成刚　李　一　李力鹏　李天友
李可卿　李永东　李永莱　李　扬　李　奎　李　亮　李海滨　李　煜
杨　荥　杨振睿　肖辉乾　肖　曦　吴创之　余南华　余维江　汪　猛
沙宁远　迟　茗　张亚晨　张　弛　张林杰　张　杰　张建勋　张　垠
张贵锋　张振世　张晓斌　张海台　张　晶　张　焰　张锦秀　张碧君
陆正嘉　陆业大　陆俭国　陆海峰　陈玉辉　陈伟明　陈　冰　陈金玉
陈海昆　陈　敏　陈　超　陈　雁　陈　新　邵晓钢　武　斌　范云刚
林海雪　罗伟明　罗　涛　金　英　金　琪　周永兴　周远翔　周谷亮
周韫捷　周　静　周肇秋　周曯昕　郑庆荣　郑泽东　房鑫炎　孟庆龙
赵希才　赵建平　赵　涛　胡劲松　咸日常　俞　正　俞国勤　俞　钧
施永梅　姜　芸　姚赤飙　姚建歆　贺宏良　聂　颖　顾春伟　顾　洁
钱　峰　徐小犬　徐丙垠　徐和平　徐　钢　徐　鸿　高　升　高赐威
郭大才　郭　杰　郭喜庆　唐　敏　诸谧玮　黄立培　黄　海　黄颖生
盛万兴　盛　明　章　伟　葛华山　董桂官　蒋洪权　焦昕秋　禄镇威
谢　伟　解　蕾　翟向向　潘国美　潘　瑾　薛永端　戴军瑛　戴璐平
瞿文龙

用电卷（第一版）撰稿人员名单

（按姓氏笔画排列）

马荫华　马济泉　王子峰　王为福　王世煜　王远美　王明德　王泰富
王瑞阁　王霁宗　毛自若　任　杰　文执中　方鸿发　邓廷佐　邓明洁
甘懋云　叶　王　叶　东　叶佩珍　叶治政　叶宗林　田　军　田　虎
史习先　白　山　冯玉琪　曲　涛　吕光大　吕　柏　朱国强　朱宝璋
华　恺　刘天齐　刘双庆　刘有常　刘志尧　刘纯先　刘宗富　刘振强
齐　钢　汤景明　许坤田　孙占一　孙百英　孙彦昕　孙翼谋　严汉彦
苏文成　杜　峥　李邦协　李临明　李朝阳　杨万志　杨伟成　杨启元
杨思乾　肖电华　肖　兰　肖辉乾　时继功　吴天汉　吴国庆　吴经琦
吴　茗　吴健雄　佟　伟　余义浦　余瑞杰　余锡仁　汪训昌　宋春生
张友良　张永生　张克让　张应端　张松春　张贤清　张国忠　张鸿源
张锡斌　陆　淳　陈元舫　陈亚鹏　陈佳玲　陈金盛　陈金镜　陈　侕
陈祖勋　林广悦　昂桂兰　罗建旋　竺子芳　金啟玫　周亮生　周　奕
周裕歧　赵庆清　赵学林　赵振民　赵淑贞　郝士茹　郝玉山　胡叔良
钟载传　钟授钊　施传立　施　非　姜俊明　贺耀华　袁维慈　顾嘉栗
钱聚英　徐纪法　徐道恒　高士国　高　升　高汉卿　高宝贤　高通文
高继昌　唐义治　黄乃勇　黄继鹄　崔淑玉　章文谦　商福崑　葛和德
蒋凤铎　蒋聪吉　喻纯新　嵇菊生　童剑浩　谢永江　詹庆旋　解广润
蔡子才　翟克俊　缪耀珊　颜竹芳　潘宗福

用电卷（第二版）修订人员名单

（按姓氏笔画排列）

于　增　王长贵　王远美　王雅生　方鸿发　方耀明　刘有常　齐　钢

许小满　许坤田　孙旭东　孙明信　孙彦昕　杜晓静　李兴权　李临明

杨　力　杨启元　肖辉乾　吴天汉　吴喜平　邱阿瑞　张大方　张友良

张　抗　张绍纲　张　涛　张　源　陈大华　陈　俪　陈留根　邵晓钢

金敔玫　周吉安　郎明宽　赵学林　赵孟祥　柄　力　饶大义　姜俊明

骆仲礼　原固均　顾嘉栗　徐纪法　郭喜庆　郭　强　黄迺元　黄　莹

葛华山　程志华　翟向向　缪耀珊　潘宗福　薛建民　霍宏烈　穆　习

戴欣祯



配电与用电卷（第三版）
主要编辑出版人员名单

责任编辑　肖　兰　李慧芳　刘利军

索引编辑　李慧芳　刘利军　肖　兰

设计负责　王建华　李东梅　李卫东　杨志国

封面设计　王红柳

正文设计　张　娟　肖光艺

责任描图　陈丽梅　李　娟

责任校对　罗凤贤　朱丽芳

责任印制　邹树群

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝中国电力百科全书　配电与用电卷（第３版）
页数＝６０２
ＳＳ号＝１３６０８５３３